

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 5 (134)

май

2012

**Редакционный совет:**

КАЛЯЕВ И. А.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗНЕЦОВ Н. А.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.  
ЧЕНЦОВ А. Г.  
ЩЕРБАТЮК 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.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
ПРОХОРОВ Н. Л.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАЧКОВ М. Ю.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФУРСОВ В. А.  
ЮРЕВИЧ Е. И.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Определение характеристик точности вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем . . . . . 2
- Кравченко П. П.** Синтез алгоритмов управления перевернутым маятником на тележке с использованием аппарата дельта-преобразований второго порядка. . . . . 6

### ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Сергеев С. Ф.** Адаптивная автоматизация деятельности оператора в среде иммерсивного интерфейса мехатронного подвижного объекта . . . . . 15
- Обознов А. А., Волков Э. В., Чернецкая Е. Д.** Образно-концептуальные модели в деятельности операторов сложных эргатических систем . . . . . 21
- Падерно П. И., Павлухин И. С., Смирнов А. В.** Развитие функционально-структурной теории для оценки качества деятельности операторов эргатических систем . . 31
- Дударенко Н. А., Сержантова (Полякова) М. В., Ушаков А. В.** Представление производственной деятельности антропокомпонента—оператора непрерывной динамической моделью с интервальными параметрами . . . . . 36

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крючков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И.** Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах . . . . . 44
- Малолетов А. В., Брискин Е. С., Колесов А. М.** О походах реконфигурируемой модульной шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями . . . . . 50

### МЕХАТРОННЫЕ СТАНОЧНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Иванов В. М.** Идентификация параметров и алгоритмы самонастройки в системах стабилизации усилия резания . . . . . 56
- Кушнир А. П.** Исследование динамических процессов в уплотнительных устройствах мехатронных шпиндельных узлов . . . . . 64

### МЕТОДОЛОГИЯ И ФИЛОСОФИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

- Виттих В. А., Игнатъев М. В., Смирнов С. В.** Онтологии в интересующих теориях . . . . . 69
- 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: [mec@novtex.ru](mailto:mec@novtex.ru)

УДК 629.191

**В. И. Миронов,**

д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,

**Ю. В. Миронов,**

д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,

mironuv@yandex.ru,

**Р. М. Юсупов,**

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор,

spiiran@iias.spb.su,

Санкт-Петербургский институт

информатики и автоматизации РАН

## Определение характеристик точности вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем

*Рассматриваются способы определения корреляционной матрицы оценок параметров состояния нелинейных динамических систем, получаемых на основе применения вариационного подхода к оцениванию при нормальном законе распределения ошибок измерений.*

**Ключевые слова:** статистическое оценивание, корреляционная матрица, нелинейные динамические системы, нормальный закон распределения

### Введение

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

Вычислительные процессы статистического оценивания параметров состояния динамической системы, как правило, должны сопровождаться определением характеристик их точности, в качестве которых обычно рассматривается корреляционная

матрица получаемых оценок. Это, в частности, необходимо для выбора эффективного состава и программы измерений.

Вместе с тем, необходимо отметить, что методы и алгоритмы решения этой задачи во многом определяются принятым методическим подходом к статистическому оцениванию параметров состояния динамической системы.

Традиционная методология оценивания в основном базируется на непосредственном применении в динамических задачах оценивания условий метода максимального правдоподобия. По смыслу они представляют собой необходимые условия оптимальности, характерные для прямых методов оптимизации. Технология применения таких методов и способы определения характеристик точности получаемых оценок широко освещены в литературе [1, 2, 6—11 и др.].

Однако методы теории оптимальной обработки измерений, как и методы теории оптимального управления, могут строиться и развиваться на основе использования вариационных условий оптимальности статистических оценок. В работах авторов [3—5 и др.] были рассмотрены вопросы обоснования указанного вариационного подхода к задачам статистического оценивания нелинейных динамических систем. Данная статья посвящена методическим аспектам определения корреляционной матрицы оценок параметров состояния нелинейных динамических систем, получаемых на основе применения вариационного подхода к оцениванию при нормальном законе распределения ошибок измерений.

### 1. Постановка задачи

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

**Задача.** Пусть динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением

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

Измерениям подвергается  $m$ -мерный вектор

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

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

$$\mathbf{y}(t_i) = \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] + \boldsymbol{\delta}_i, \quad i = \overline{1, N}; t_i \in [t_0, T]. \quad (2)$$

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

$$f(\boldsymbol{\delta}_i) = (2\pi)^{-1/2} |\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}|^{-1/2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] \}^T \mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1} \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] \} \right].$$

В соответствии с методом максимального правдоподобия требуется найти такую оценку вектора  $\mathbf{x}_0$ , которая обеспечивает минимальное значение функционала

$$I = \ln W(\mathbf{y}/\mathbf{x}_0) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] \}^T \mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}^{-1} \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] \}, \quad (3)$$

где

$$W(\mathbf{y}/\mathbf{x}_0) = \prod_{i=1}^N f_i(\boldsymbol{\delta}_i); \quad (4)$$

$W(\mathbf{y}/\mathbf{x}_0)$  — функция правдоподобия.

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

Предполагается выполнение известных условий наблюдаемости.

## 2. Вариационные условия оптимальности оценок

Для решения указанной задачи в работе авторов [4] получены условия оптимальности оценок вариационного типа, которые сформулируем следующим образом.

Оптимальная оценка вектора  $\mathbf{x}_0$  и порождаемая ею оптимальная траектория  $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$  доставляют решение двухточечной краевой задаче для канонической системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, t); \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \quad (5)$$

при граничных условиях

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = 0; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = 0; \quad (6)$$

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

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

Таким образом, рассматриваемую задачу можно интерпретировать как двухточечную краевую задачу с промежуточными ограничениями на сопряженный вектор  $\boldsymbol{\lambda}(t)$ . Она выражает необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа по критерию максимального правдоподобия.

В данном случае решение соответствующей краевой задачи сводится к поиску корней краевого уравнения

$$\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T) = 0, \quad (7)$$

где  $\mathbf{q} \equiv \mathbf{x}_0$ .

Здесь  $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)$  — значение сопряженного вектора, определенное для конечного момента времени  $t = T$  мерного интервала.

Уравнение (7) является вариационным аналогом известного уравнения правдоподобия. Оно задано неявно на процедурах интегрирования системы (5).

Для поиска оптимальных оценок можно привлекать известные методы численного решения краевых задач (метод Ньютона, градиентные методы, их модификации и др.).

При использовании метода Ньютона соответствующая вычислительная схема решения уравнения (7) имеет вид

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k - \left[ \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}} \right]_k^{-1} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}_k, T), \quad (8)$$

где  $k$  — номер итерации.

Полагаем

$$\det \left[ \frac{\partial \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}} \right]_k \neq 0.$$

Для реализации этого процесса необходимо на каждой итерации вычислять значение  $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)$  и матрицу первых производных  $\frac{\partial \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}}$ . Величина  $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{q}, T)$

определяется путем однократного прямого интегрирования сопряженной системы (5) порядка  $2n$ . Матрица частных производных может быть определена методом конечных разностей на основе  $n$ -кратного численного интегрирования той же системы (5) при последовательно возмущаемых начальных условиях.

## 3. Определение характеристик точности оптимальных оценок

Точность оптимальных оценок вариационного типа будем характеризовать значением корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_{\mathbf{q}} \equiv \mathbf{K}_{\mathbf{x}_0}$ .

Независимо от того, какой вариант условий оптимальности принят для решения задачи оценивания, получаемая оценка  $\mathbf{q}$  вектора начального состоя-

ния системы  $\mathbf{x}_0$  в общем случае оказывается нелинейной функцией выборочных значений измерений:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N). \quad (9)$$

Поэтому при достаточно строгом рассмотрении для оценки характеристик точности получаемых оценок и, в частности, корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_q$  необходимо привлекать известные методы нелинейного статистического анализа, такие как метод статистического моделирования, метод эквивалентных возмущений, интерполяционный метод и др.

В рамках приближенного подхода при достаточно высокой точности измерений для оценки матрицы  $\mathbf{K}_q$  вполне допустимо применение метода линеаризации.

Применяя метод линеаризации к уравнению (9) и используя допущения о независимости ошибок измерений, полученных в различные моменты времени, приходим к традиционной оценке корреляционной матрицы

$$\mathbf{K}_q = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{y}_i} \mathbf{K}_{\delta_i} \frac{\partial \mathbf{q}^T}{\partial \mathbf{y}_i}. \quad (10)$$

Однако для ее расчета необходимо вычисление матриц частных производных  $\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{y}_i}$ .

Заметим далее, что при использовании вариационного метода максимального правдоподобия оценка (9) является решением краевого уравнения (7), которое запишем в виде

$$\lambda(\mathbf{q}, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N/T) = 0.$$

Варьируя это уравнение, получаем равенство

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \Delta \mathbf{q} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{y}_i} \Delta \mathbf{y}_i = 0,$$

с помощью которого находим следующую оценку:

$$\mathbf{K}_q = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^N \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{y}_i} \mathbf{K}_{\delta_i} \frac{\partial \lambda^T}{\partial \mathbf{y}_i} \right) \left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right)^{-1} \right]^T. \quad (11)$$

Из сопоставления (10) и (11) устанавливается следующая связь между соответствующими производными от вектора  $\mathbf{q}$  и от вектора  $\lambda(\mathbf{q}, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N/T)$ :

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{y}_i} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right)^{-1} \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{y}_i}; \quad i = \overline{1, N}.$$

Это позволяет сократить объем вычислений при оценке матрицы  $\mathbf{K}_q$ , однако, несмотря на это, он остается достаточно большим, поскольку в общем случае для определения  $\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{y}_i}$  необходимо привлекать метод конечных разностей и, следовательно, много-

кратно интегрировать дифференциальные уравнения краевой задачи.

Значительно более простой и эффективный метод оценки корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_q$  может быть получен на основе использования неравенства Рао—Крамера [7].

Известно, что если для данной выборки  $\mathbf{y}$  существует такая нелинейная оценка  $\tilde{\mathbf{q}}$  вектора параметров  $\mathbf{q}$ , для которой в неравенстве Рао—Крамера

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{q}}) \geq \left\{ M \left[ - \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{q} \partial \mathbf{q}^T} \ln W(\mathbf{y}/\mathbf{q}) \right] \right\}^{-1} = \mathbf{K}_{q_{\min}} \quad (12)$$

достигается знак равенства, то этой оценкой является оценка метода максимального правдоподобия (такая оценка называется эффективной). В этом выражении  $W$  есть функция правдоподобия. Матричное неравенство (12) понимается в том смысле, что разность  $\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{q}}) - \mathbf{K}_{q_{\min}}$  является неотрицательно определенной матрицей.

Эффективная оценка на выборке конечного объема, и особенно в нелинейных задачах, существует далеко не всегда. Однако во многих практических приложениях, например, в области навигации космических аппаратов, это не является принципиальным ограничением, поскольку применение метода максимального правдоподобия обеспечивает точность, достаточно близкую к уровню максимальной точности оценивания. Поэтому для приближенной характеристики точности оценок и анализа их соответствия заданным требованиям вполне допустимо использование матрицы  $\mathbf{K}_{q_{\min}}$  [1, 10 и др.]

при  $\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{q}}$ .

На этом основании приближенно можно положить

$$\mathbf{K}_q = \Phi^{-1}(\mathbf{y}/\tilde{\mathbf{q}}), \quad (13)$$

где

$$\Phi = - \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{q} \partial \mathbf{q}^T} \ln W(\mathbf{y}/\tilde{\mathbf{q}}) = - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{f}(\mathbf{y}/\tilde{\mathbf{q}}), \quad (14)$$

— приближенное значение информационной матрицы Фишера.

В этом выражении вектор-функция  $\mathbf{f}(\mathbf{y}/\tilde{\mathbf{q}})$  является левой частью уравнения правдоподобия, получаемого при решении рассматриваемой задачи оценивания прямым методом максимального правдоподобия. В данном случае это уравнение имеет вид

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \mathbf{x}_i^T}{\partial \mathbf{q}} \frac{\partial \Psi^T}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{K}_{\delta_i}^{-1} [\mathbf{y}_i - \Psi(\mathbf{x}_i)] = 0; \quad \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{U}(t_i, t_0), \quad (15)$$

где  $\mathbf{U}(t, \tau)$  — нормированная фундаментальная матрица решений линейного уравнения

$$\dot{\xi} = \frac{\partial \Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \xi,$$

получаемого линеаризацией исходной системы (1).

Величины  $\frac{\partial \mathbf{x}_j}{\partial \mathbf{q}}$  представляют собой матрицы частных производных от текущих параметров движения на момент измерений по оцениваемым параметрам  $\mathbf{q} \equiv \mathbf{x}_0$ .

В работе авторов [3] было показано, что функции  $\lambda(\mathbf{q}, T)$  и  $\mathbf{f}(\mathbf{q}, T)$  связаны соотношением

$$\lambda(\mathbf{q}, T) = \mathbf{V}(T, t_0)\mathbf{f}(\mathbf{q}, T), \quad (16)$$

где  $\mathbf{V}(t, \tau)$  — нормированная фундаментальная матрица решений однородной сопряженной системы

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

Поэтому после дифференцирования уравнения (16) по  $\mathbf{q}$  получим следующее выражение, устанавливающее связь их производных для оптимальных оценок  $\mathbf{q}$ :

$$\frac{\partial \lambda(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{V}(T, t_0) \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}}.$$

Отсюда находим, что

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{V}^{-1}(T, t_0) \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}}. \quad (17)$$

Подставляя это значение производной в выражение (14), из (13) получаем следующее соотношение для определения корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_q$ :

$$\mathbf{K}_q = -\left[ \mathbf{V}^{-1}(T, t_0) \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right]^{-1} = -\left( \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right)^{-1} \mathbf{V}^{-1}(T, t_0). \quad (18)$$

Принимая далее во внимание известное равенство, устанавливающее связь нормированных фундаментальных матриц  $\mathbf{U}(T, \tau)$  и  $\mathbf{V}(T, \tau)$  сопряженных систем линейных дифференциальных уравнений,

$$\mathbf{V}(t, \tau) = [\mathbf{U}^T(t, \tau)]^{-1},$$

из (18) находим выражение

$$\mathbf{K}_q = -\left[ \mathbf{U}^T(T, t_0) \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}} \right]^{-1}. \quad (19)$$

Применение этой формулы значительно сокращает объем вычислений при расчете корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_q$  по сравнению с рассмотренными выше способами (10) и (11), поскольку в данном случае не требуется вычислять матрицы частных производных  $\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{y}_i}$  и  $\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{y}_i}$ . Матрица  $\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}}$ , входящая в (19), вычисляется при получении оптимальных оценок вектора  $\mathbf{q} = \mathbf{x}_0$  по методу Ньютона (8), а матрица  $\mathbf{U}(T, t_0)$  легко определяется попутно методом конечных разностей по результатам численного интегрирования уравнений динамики объекта, проводимых для расчета  $\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{q}}$ .

В заключение отметим, что полученное решение является достаточно экономичным в вычислительном отношении и поэтому может быть эффективно использовано при определении характеристик точности оценок параметров состояния нелинейных динамических систем, получаемых на основе применения вариационного подхода к оцениванию.

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

#### Список литературы

1. Брандин Н. К., Разоренов Г. Н. Определение траекторий КА. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
2. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.
3. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Адекватность прямого и вариационного подходов в задачах оценивания состояния нелинейных динамических систем при гауссовских ошибках измерений // Мехатроника, автоматизация управления. № 11. 2010. С. 9–11.
4. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия // Мехатроника, автоматизация, управление. № 11. 2009. С. 2–6.
5. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Метод наименьших квадратов в задачах вариационного оценивания состояния нелинейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 2–6.
6. Мудров В. И., Кушко В. П. Методы обработки измерений. М.: Сов. радио, 1976. 190 с.
7. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение. М.: Наука, 1968. 548 с.
8. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
9. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. МО СССР, 1984. 563 с.
10. Степанов М. Г. Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченному данным. СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. 135 с.
11. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.

**П. П. Кравченко**, д-р техн. наук, проф.,  
kravch@tti.sfedu.ru,

Технологический институт Южного федерального  
университета в г. Таганроге

## **Синтез алгоритмов цифрового управления перевернутым маятником на тележке с использованием аппарата дельта-преобразований второго порядка**

*Решение данной задачи базируется на наиболее полной из соответствующих известных нелинейных систем дифференциальных уравнений движения и использовании методологии оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Рассмотрен синтез единого алгоритма управления маятником и тележкой, показана возможность обеспечения гарантированных показателей качества по точности и быстродействию, освещены результаты модельных экспериментов при постоянных и изменяющихся задающих воздействиях, различных видах трения.*

**Ключевые слова:** маятник, тележка, нелинейные дифференциальные уравнения, оптимизированные дельта-преобразования второго порядка, гарантированные показатели качества, оптимизация по быстродействию и точности, трение, задающие воздействия

### **Введение**

Рассматривается одна из классических задач механики и теории управления, которая на практике связана с работой разнообразных установок, манипуляционных роботов, движением ракеты, сверхзвукового самолета, состава толкаемых буксиром барж — объектов, центр масс и точка приложения силы которых не совпадают [1—3]. Данная задача известна как одна из тестовых для оценки качества и эффективности методов синтеза алгоритмов управления.

Будем рассматривать перевернутый маятник, ось которого монтируется на тележке. Необходимо решать задачу перевода маятника из заданного положения в верхнее вертикальное путем управления движением тележки и перемещения тележки вместе с находящимся в вертикальном положении маятником в соответствии с задающим воздействием (по заданной траектории). В работах [3—10] приведены обширные списки литературы и обзоры с анализом опубликованных результатов синтеза алгоритмов управления для управления неустойчивым маятником. В качестве работ, исследования в которых наиболее близки по постановке к рассматриваемой задаче, можно выделить, например [3, 7, 9, 10]. Для известных исследований характерны в разных сочетаниях следующие особенности: существенные отклонения в представлении исходных нелинейных систем дифференциальных уравнений движения (видоизменение, упрощение уравнений

с ограничением веса маятника относительно массы тележки, линеаризация и т. п.); неустойчивость в большом; эвристический характер синтеза (например, при использовании нечетких методов синтеза); отсутствие теоретических возможностей синтеза алгоритмов управления с оценками качественных характеристик по точности и быстродействию; отсутствие или существенные ограничения априорного изменения характеристик путем варьирования используемых в синтезируемых алгоритмах управления параметров; управление перемещением тележки с находящимся исходно только в вертикальном положении маятником; отсутствие методологий с возможностью априорного учета в синтезе шага временной дискретизации процесса управления; отсутствие учета влияния сил трения в тележке и оси маятника и некоторые другие особенности, ограничивающие эффективное практическое использование соответствующих методологий синтеза.

При решении данной задачи придерживаемся следующих важных с практической точки зрения положений:

- должна реализовываться возможность решения задачи перевода маятника из заданного положения в вертикальное, перемещения тележки из заданной начальной в заданную конечную точку или движения тележки в соответствии с изменяющимся задающим воздействием на основе одного управляющего воздействия;
- должны использоваться известные исходные нелинейные дифференциальные уравнения движения, которые в наибольшей мере соответствуют реальным процессам движения управляемого маятника на тележке; в качестве такого описания взята приведенная в книге [6] система нелинейных дифференциальных уравнений движения неустойчивого маятника на тележке;
- имитация движения при проведении модельных экспериментов должна выполняться без упрощения исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений;
- при синтезе алгоритма одновременного управления положением маятника и тележки принимаемые решения должны быть теоретически обоснованными, методология синтеза должна базироваться на возможности использования гарантированных теоретических оценок;
- методология синтеза алгоритмов должна быть ориентирована на цифровое (с дискретным шагом) управление;
- при синтезе алгоритмов цифрового управления должны использоваться принципы оптимизации переходных процессов по быстродействию и установившихся по точности с учетом нелинейностей исходных дифференциальных уравнений движения;
- методология синтеза должна представлять теоретические возможности варьирования качествен-

ных характеристик по быстродействию и точности на основе параметров, входящих в синтезируемый алгоритм управления;

- должны предусматриваться возможности учета действия сил трения в оси маятника и при движении тележки.

### Математическая модель движения тележки с перевернутым маятником

Тележка может двигаться только прямолинейно в горизонтальном направлении и приводится в движение прикладываемой силой в виде управляющего воздействия  $\mu(t)$  в момент времени  $t$  (рис. 1) [6]. Горизонтальное перемещение тележки характеризуется функцией  $S(t)$ , угловое отклонение маятника —  $\varphi(t)$ . Используются обозначения:  $m$  — масса маятника;  $L$  — расстояние между осью и центром тяжести маятника ( $2L$  — длина маятника);  $J$  — момент инерции относительно центра тяжести маятника;  $M$  — масса тележки;  $T_c(t)$  — сила трения при движении тележки;  $f_p$  — коэффициент трения в оси маятника. В центре тяжести к маятнику приложена сила  $mg$  ( $g$  — ускорение свободного падения), а у оси — горизонтальная  $H(t)$  и вертикальная  $V(t)$  силы реакции.

Дифференциальные уравнения движения могут быть записаны в виде [6]:

$$m\ddot{S}(t) + mL\ddot{\varphi}(t)\cos\varphi(t) - mL\dot{\varphi}^2(t)\sin\varphi(t) = H(t); \quad (1)$$

$$-mL\ddot{\varphi}(t)\sin\varphi(t) - mL\dot{\varphi}^2(t)\cos\varphi(t) = V(t) - mg; \quad (2)$$

$$J\ddot{\varphi}(t) = LV(t)\sin\varphi(t) - LH(t)\cos\varphi(t) - f_p\dot{\varphi}(t); \quad (3)$$

$$M\ddot{S}(t) = \mu(t) - H(t) - T_c(t);$$

$$\varphi(t = t_0); \dot{\varphi}(t = t_0); S(t = t_0); \dot{S}(t = t_0). \quad (4)$$

Систему уравнений (1)–(4) преобразуем с использованием подстановок к следующему эквивалентному виду:

$$\ddot{\varphi}(t) = -\frac{\cos\varphi(t)\mu(t)}{L'(t)(M+m)} + \frac{\sin\varphi(t)}{L'(t)} \left[ g - L\dot{\varphi}^2(t)\cos\varphi(t) + \frac{LM\dot{\varphi}^2(t)\cos\varphi(t)}{M+m} \right] + \frac{\cos\varphi(t)T_c(t)}{L'(t)(M+m)} - \frac{f_p\dot{\varphi}(t)}{L'(t)mL}; \quad (5)$$

$$\ddot{S}(t) =$$

$$= \frac{\mu(t) - mL\ddot{\varphi}(t)\cos\varphi(t) + mL\dot{\varphi}^2(t)\sin\varphi(t) - T_c(t)}{M+m}; \quad (6)$$

$$L'(t) = \frac{J + L^2m \left[ \sin^2\varphi(t) + \frac{M}{M+m}\cos^2\varphi(t) \right]}{mL};$$

$$\varphi(t = t_0); \dot{\varphi}(t = t_0); S(t = t_0); \dot{S}(t = t_0).$$

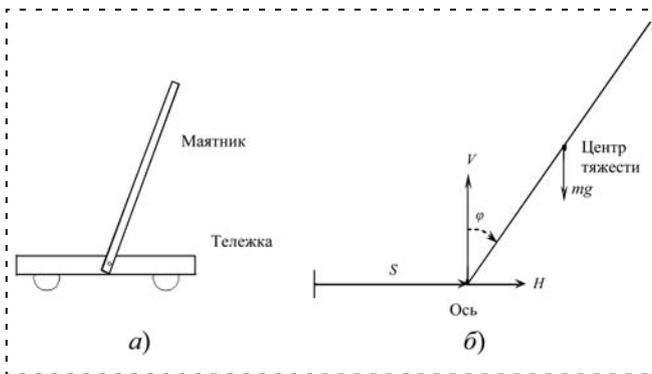


Рис. 1. Перевернутый маятник на тележке (а), действующие силы и перемещения (б)

Данная система дифференциальных уравнений используется в экспериментальной модели для имитации поведения маятника и тележки без упрощений. При проведении модельных экспериментов сила трения  $T_c(t)$  вводится в виде постоянной величины или линейно изменяющегося значения  $T_c(t) = f_{c1}(\dot{S}(t))$ , где  $f_{c1} = \text{const}$ , или  $T_c(t) = f_{c2}(|\dot{S}(t)|)\text{sign}(\dot{S}(t))$ , где  $f_{c2}(|\dot{S}(t)|)$  — задаваемая графически нелинейно изменяющаяся функция; сила трения  $f_p$  вводится в виде постоянной величины.

Одной из проблем в решении данной задачи является то, что управление двумя переменными ( $\mu(t)$  и  $S(t)$ ) должно быть обеспечено с помощью одного управляющего воздействия  $\mu(t)$ .

### Физическая сущность решения задачи

В ряде работ, например [4, 5, 7, 9], используется управление, обеспечивающее перемещения тележки *вперед-назад*. В данной работе используется сходное положение, однако решение задачи на основе методологии оптимизированных дельта-преобразований второго порядка имеет специфические особенности, и данный вопрос следует рассмотреть подробнее.

Сущность рассматриваемого решения задачи можно проиллюстрировать в виде совмещенных во времени трех процессов в действиях человека: выведение размещенной на пальце руки палки из заданного положения в вертикальное, движение в определенном направлении с удержанием палки в вертикальном положении и удержание палки в вертикальном положении в конечной точке. В идеальном случае человек после вывода палки на вертикаль в начале направленного движения обеспечивает небольшой наклон палки относительно вертикали в направлении движения (*разгон движения*), а в некоторый момент времени при приближении к конечной точке — наклон в сторону, противоположную движению (*торможение*). Реально при движении человека осуществляются движением тела и руки многократные процессы *разгона/торможения*.

## Преобразование исходных уравнений движения к виду для синтеза алгоритмов управления

Алгоритмизация процесса управления перемещением тележки с маятником по заданной траектории базируется, в частности, на изложенной выше физической сущности решения задачи.

Можно выделить два процесса:

1) управление переводом маятника в вертикальное положение при больших начальных отклонениях маятника;

2) управление движением тележки при одновременном поддержании маятника в вертикальном положении.

Синтез алгоритма управления маятником по п. 1 соответствует, в частности, отклонениям в большом и должен реализовываться без упрощения соответствующих исходных нелинейных уравнений движения.

При нахождении маятника в вертикальном управляемом положении алгоритмы, обеспечивающие управление тележкой, могут базироваться на упрощенном представлении соответствующих компонент уравнений движения. Сущность этого упрощения состоит в следующем. Пусть в некоторый момент времени  $t$  при значении управляющего воздействия  $\mu(t) = \text{const}$  вертикальное положение маятника оказывается неподвижно зафиксировано, т. е.  $\varphi(t) = \text{const}$  и, соответственно,  $\dot{\varphi}(t) = 0$ ,  $\ddot{\varphi}(t) = 0$ , а также  $\varphi(t) \neq 0$  и значение модуля  $|\varphi(t)|$  достаточно мало ( $|\varphi(t)| \ll 1$ ), настолько, что можно записать  $\sin\varphi(t) \approx \varphi(t)$ ,  $\cos\varphi(t) \approx 1$ ,  $\varphi^2(t) \approx 0$ . Тогда на основе (1)–(4), пренебрегая трением, имеем

$$\ddot{S}(t) \approx H(t)/m; \quad (7)$$

$$V(t) \approx mg; \quad (8)$$

$$H(t) \approx V(t)\varphi(t). \quad (9)$$

Здесь  $V(t) > 0$ ,  $V(t) \approx \text{const}$  и в итоге

$$\ddot{S}(t) \approx \varphi(t)g, \quad (10)$$

где при данных условиях также  $\varphi(t)g \approx \text{const}$ .

Из рассмотрения (8), (9) видно, что если  $\varphi(t) \neq 0$ , то и  $H(t) \neq 0$ , причем  $\text{sign}(H(t)) = \text{sign}(\varphi(t))$ . Вместе с тем, получаем, что *разгон/торможение*  $S(t)$  может осуществляться управлением второй производной  $\ddot{S}(t)$ , т. е. в данных условиях непосредственно усилием  $H(t)$  (7). Таким образом, чтобы осуществлять управление перемещением по  $S(t)$  при вертикальном положении маятника, достаточно обеспечивать режимы *разгона/торможения* путем задания в определенные моменты времени значений  $|\varphi(t)|$  с соответствующим знаком. Большим значениям  $|\varphi(t)|$  будут соответствовать большие значения  $|H(t)|$  и, соответственно, большие ускорения *разгона/торможения*, меньшим  $|\varphi(t)|$  — меньшие.

Возможность успешного использования для решения поставленной задачи рассмотренных выше положений, в частности, основана на том, что длительность перехода тележки из начальной точки в заданное конечное состояние в рамках, по крайней мере, рассматриваемой методологии, происходит существенно дольше, чем длительность перехода маятника из начального в вертикальное состояние. Благодаря этому движение тележки протекает при преимущественном по величине конечном отрезке времени нахождения маятника в вертикальном состоянии, и приведенные выше условия могут выполняться в достаточной для получения высоких технических характеристик степени.

С учетом изложенных выше допущений для синтеза алгоритма управления используются уравнение (5), в котором по аналогии вводятся для приближенного учета трения в алгоритмах управления параметры  $T_c^*(t)$  и  $f_p^*$ , и уравнение (10).

## Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка и синтез алгоритмов цифрового управления

Сущность дельта-преобразований второго порядка состоит в формировании с дискретным шагом  $\forall t$  для данной исходной функции (сигнала) аппроксимирующей функции, вторые разности или вторые производные которой на шаге преобразования принимают значения из ограниченного множества величин, например,  $+1$ ,  $0$  и  $-1$ . Многие годы проблема неустойчивости известных алгоритмов дельта-преобразований второго порядка существенно ограничивала их практическое использование [11, 12]. Впервые алгоритмы оптимизированных по быстродействию и точности дельта-преобразований второго порядка разработаны автором данной статьи; всего получено шесть алгоритмов, ориентированных на различные применения. Основы теории и возможности практического использования новых алгоритмов в областях цифрового управления, компрессии и защиты сигналов от несанкционированного доступа, алгоритмизации для параллельных специализированных вычислительных средств, построения сплайнов для компьютерной графики описаны, например, в работе [13].

В качестве ближайшего аналога данных алгоритмов можно рассматривать классические алгоритмы оптимального непрерывного управления объектом в виде двух последовательных интегрирующих звеньев [14]. Характерной особенностью алгоритмов дельта-преобразований, как и алгоритмов аналога, является наличие прогнозирующей (переключающей) функции, на основе которой осуществляется определение знака кванта преобразования. Внешне фазовый портрет в обоих случаях имеет один и тот же характер.

В работе [13] освещены, в частности, следующие возможности, обусловленные применением новых алгоритмов дельта-преобразований второго порядка для синтеза алгоритмов цифрового управления: единая простая инженерная методика синтеза алгоритмов цифрового управления (с дискретным шагом) для линейных и нелинейных объектов; оптимизация в условиях априорно задаваемых показателей качества по быстродействию и точности; получение гарантированных показателей качества на конечных интервалах; оптимизация по точности с адаптацией к неконтролируемым произвольным по характеру изменения внешним возмущающим воздействиям; оперирование с постоянно изменяющимися задающими воздействиями; грубость алгоритмов; синтез алгоритмов управления для систем с частичной структурной и параметрической неопределенностями; управление объектом, уравнения движения которого содержат ограниченные нестационарные параметры; перспективность использования для подвижных объектов в нормативных и экстремальных условиях и некоторые другие.

Сущность методологии синтеза алгоритмов управления состоит в том, что формируется процесс управления, эквивалентный процессу оптимизированного Д-преобразования второго порядка. Особенностью применения Д-преобразований для управления является, в частности, то, что для различных объектов имеют место фактически шаблонные характеристики для областей управляемости, качественные оценки и рекомендации, которые могут быть априорно использованы при проектировании цифровой системы управления. В частности, при отсутствии (или слабом влиянии) внешних возмущений качественные экспериментальные оценки существенно не отличаются от соответствующих теоретических значений гарантированных показателей дельта-преобразований второго порядка (назначение  $c^*$  будет рассмотрено ниже) [13]:

- ошибка установившегося процесса (для троичного алгоритма):

$$|z(t)| \lesssim 0,5c^*; \quad (11)$$

- число шагов и длительность переходного процесса ( $\dot{z}(t_0) \approx 0$ ):

$$R_{\text{пер}} \approx 2 \sqrt{\frac{|z(t_0)|}{c^*}}, \quad T_{\text{пер}} \approx R_{\text{пер}} \nabla t. \quad (12)$$

Методология решения рассматриваемой в рамках данной статьи задачи базируется на использовании оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Приводим запись выделенных для синтеза уравнений в соответствие с принятыми в работе [13] обозначениями  $x_1(t) = \varphi(t)$ ,  $\dot{x}_1(t) = \dot{\varphi}(t)$ ,  $\ddot{x}_1(t) = \ddot{\varphi}(t)$ ,  $x_2(t) = S(t)$ ,  $\dot{x}_2(t) = \dot{S}(t)$ ,  $\ddot{x}_2(t) = \ddot{S}(t)$ ,  $U(t) = \mu(t)$ :

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1(t) = & -\frac{\cos x_1(t) U(t)}{L'(t)(M+m)} + \\ & + \frac{\sin x_1(t)}{L'(t)} \left[ g - L\dot{x}_1^2(t) \cos x_1(t) + \frac{LM\dot{x}_1^2(t) \cos x_1(t)}{M+m} \right] + \\ & + \frac{\cos x_1(t) T_c^*}{L'(t)(M+m)} - \frac{f_p^* \dot{x}_1(t)}{L'(t)mL}; \end{aligned}$$

$$\ddot{x}_2(t) \approx x_1(t)g;$$

$$x_1(t = t_0); \dot{x}_1(t = t_0); x_2(t = t_0); \dot{x}_2(t = t_0).$$

Вводим задающие воздействия  $\ddot{y}_{\text{зад}, 1}(t)$ ,  $\ddot{y}_{\text{зад}, 2}(t)$  и переходим к записи уравнений с учетом ошибок управления:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_1(t) = & -\frac{\cos x_1(t) U(t)}{L'(t)(M+m)} + \\ & + \frac{\sin x_1(t)}{L'(t)} \left[ g - L\dot{x}_1^2(t) \cos x_1(t) + \frac{LM\dot{x}_1^2(t) \cos x_1(t)}{M+m} \right] + \\ & + \frac{\cos x_1(t) T_c^*}{L'(t)(M+m)} - \frac{f_p^* \dot{x}_1(t)}{L'(t)mL} - \ddot{y}_{\text{зад}, 1}(t); \quad (13) \end{aligned}$$

$$\ddot{z}_2(t) \approx x_1(t)g - \ddot{y}_{\text{зад}, 2}(t);$$

$$x_1(t = t_0); \dot{x}_1(t = t_0); x_2(t = t_0); \dot{x}_2(t = t_0). \quad (14)$$

На основе (13), (14) вводим обозначения квантов преобразования и переходим к записи для  $(i+1)$ -го шага ( $N$  — число дискретных шагов  $\nabla t$  моделирования):

$$\begin{aligned} L'_{i+1}(t) = \\ = \frac{J + L^2 m \left[ \sin^2 x_{1, i+1}(t) + \frac{M}{M+m} \cos^2 x_{1, i+1}(t) \right]}{mL}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_{1, i+1}(t) = & -\frac{\cos x_{1, i+1}(t) U_{i+1}(t)}{L'_{i+1}(t)(M+m)} + \\ & + \frac{\sin x_{1, i+1}(t)}{L'_{i+1}(t)} \left[ g - L\dot{x}_{1, i+1}^2(t) \cos x_{i+1}(t) + \right. \\ & \left. + \frac{LM\dot{x}_{1, i+1}^2(t) \cos x_{i+1}(t)}{M+m} \right] + \\ & + \frac{\cos x_{1, i+1}(t) T_c^*}{L'_{i+1}(t)(M+m)} - \frac{f_p^* \dot{x}_{1, i+1}(t)}{L'_{i+1}(t)mL}; \quad (15) \end{aligned}$$

$$\ddot{Y}_{2, i+1}(t) = x_{1, i+1}(t)g;$$

$$i = \overline{0, N}; t \in [t_i; t_{i+1}]. \quad (16)$$

Учитывая (15) и (16), уравнения (13), (14) представляем в виде

$$\ddot{z}_{j,i+1}(t) = \ddot{Y}_{j,i+1} - \ddot{y}_{\text{зад},j,i+1}(t);$$

$$\ddot{Y}_{j,i+1} = \ddot{Y}_{j,i+1}(t) = \text{const на } t \in [t_i; t_{i+1}];$$

$$i = \overline{0, N}; j = \overline{1, 2}.$$

Предполагая, что ординаты ошибок и их производные

$$z_{j,i} = z_j(t_i) = x_{j,i} - y_{\text{зад},j,i};$$

$$\dot{z}_{j,i} = \dot{z}_j(t_i) = \dot{x}_{j,i} - \dot{y}_{\text{зад},j,i}; i = \overline{0, N}; j = \overline{1, 2}$$

являются измеряемыми, далее можно использовать троичный алгоритм дельта-преобразования и определять значение  $\ddot{Y}_{j,i+1}, j = \overline{1, 2}$  [13]:

$$\left. \begin{aligned} z_{ji} &= x_{ji} - y_{\text{зад},ji}; \dot{z}_{ji} = \dot{x}_{ji} - \dot{y}_{\text{зад},ji}; \\ F_{ji}^1 &= z_{ji} + 2\dot{z}_{ji}\nabla t + (0,5(\dot{z}_{ji}\nabla t)^2/c_j + 0,5c_j)\text{sign}(\dot{z}_{ji}); \\ F_{ji}^2 &= z_{ji} + \dot{z}_{ji}\nabla t + (0,5(\dot{z}_{ji}\nabla t)^2/c_j - 0,5c_j)\text{sign}(\dot{z}_{ji}); \\ \text{если } F_{ji}^1 F_{ji}^2 &> 0, \text{ то } \Delta_{j,i+1} = -\text{sign} F_{ji}^1; \\ \text{иначе } \Delta_{j,i+1} &= 0; \\ \ddot{Y}_{j,i+1} &= c_j^* \Delta_{j,i+1} / (\nabla t)^2; t \in [t_i; t_{i+1}]; \\ c_j &= 0,75c_j^*, c_j^* > 0; j = \overline{1, 2}. \end{aligned} \right\} (17)$$

Здесь  $F_{ji}^1$  и  $F_{ji}^2$  — прогнозирующие функции,  $\Delta_{j,i+1}$  — формируемый знак кванта преобразования  $\ddot{Y}_{j,i+1}$ . Значения  $\Delta_{j,i+1} \in \{+1; 0; -1\}$  определяют режимы разгон/0/торможение при  $j = 1$  для маятника и при  $j = 2$  для тележки.

Особенности использования, в частности, алгоритма (17) освещены ниже.

### Управление положением маятника без учета расположения тележки

При реализации управления маятником в данной постановке задачи отсутствует необходимость реализации режима разгон/0/торможение.

Значение  $c_1^*$  для алгоритма дельта-преобразования (17) выбирается исходя из требуемых (или компромиссно определяемых) гарантированных по значению числа шагов и длительности с учетом шага дискретизации  $\nabla t$  переходного процесса (12), а также ошибки в установившемся процессе движущегося маятника (11). В результате оценивается

$\ddot{Y}_{1,i+1}$ . На основе (15) и значения  $\ddot{Y}_{1,i+1}$  получаем для управляющего воздействия

$$U_{i+1}(t) = -\frac{L'_{i+1}(t)(M+m)}{\cos x_{1,i+1}(t)} \left\{ \ddot{Y}_{1,i+1} - \frac{\sin x_{1,i+1}(t)}{L'_{i+1}(t)} \left[ g - L\dot{x}_{1,i+1}^2 \cos x_{1,i+1}(t) + \frac{LM\dot{x}_{1,i+1}^2(t)\cos x_{1,i+1}(t)}{M+m} \right] - \frac{\cos x_{1,i+1}(t)T_c^*(t)}{L'_{i+1}(t)(M+m)} + \frac{f_p^* \dot{x}_{1,i+1}(t)}{L'_{i+1}(t)mL} \right\}; i = \overline{0, N}; t \in [t_i; t_{i+1}].$$

Последнее выражение записано для непрерывного времени, и в этих условиях должно предполагаться непрерывное формирование на шаге  $\nabla t$  управляющего воздействия при обеспечении постоянства кванта преобразования, что является необходимым условием при использовании методологии дельта-преобразований.

Следует обратить внимание на то, что квант преобразования в правой части выражения имеет "виртуальный" ("промежуточный") характер. Однако при переходе к цифровому управлению, когда управляющие воздействия должны формироваться в дискретные моменты времени, условия обеспечения постоянства "виртуального" кванта преобразования могут быть существенно нарушены, и возникающие при этом неконтролируемые возмущающие воздействия могут привести к качественному ухудшению процесса управления, вплоть до его разрушения. В связи с этим появляется необходимость введения дополнительной дискретизации в пределах шага в целях минимизации отклонений "виртуального" значения от постоянного в пределах шага  $\nabla t$ . Введение дополнительной дискретизации в общем случае не всегда является обязательным, и данный вопрос может разрешаться в процессе проведения экспериментов.

Теперь с учетом возможной необходимости реализации управления с дополнительным дроблением шага  $\nabla t$  на  $\nabla\tau$  ( $\nabla\tau = r\nabla\tau, \tau = \nabla\tau \cdot \sigma; t_{i+1,\sigma} = t_i + \nabla\tau \cdot \sigma; \sigma = 0, 1, 2, \dots, (r-1)$ ) последние выражения представляются в виде

$$L'_{i+1,\sigma} = \frac{J + L^2 m \left[ \sin^2 x_{1,i+1,\sigma} + \frac{M}{M+m} \cos^2 x_{1,i+1,\sigma} \right]}{mL};$$

$$U_{i+1, \sigma} = -\frac{L'_{i+1, \sigma}(M+m)}{\cos x_{i+1, \sigma}} \left\{ \ddot{Y}_{1, i+1} - \frac{\sin x_{1, i+1, \sigma}}{L'_{i+1, \sigma}} \left[ g - L\dot{x}_{1, i+1, \sigma}^2 \cos x_{1, i+1, \sigma} + \frac{LM\dot{x}_{1, i+1, \sigma}^2 \cos x_{1, i+1, \sigma}}{M+m} \right] - \frac{\cos x_{1, i+1, \sigma} T_{c, i+1, \sigma}^*}{L'_{i+1, \sigma}(M+m)} + \frac{f_p^* \dot{x}_{1, i+1, \sigma}(t)}{L'_{i+1, \sigma} mL} \right\}; i = \overline{0, N}; \sigma = \overline{0, (r-1)}. \quad (18)$$

Переменные  $x_{1, i+1, \sigma}, \dot{x}_{1, i+1, \sigma}, x_{2, i+1, \sigma}, \dot{x}_{2, i+1, \sigma}, \sigma = \overline{0, (r-1)}$ , формируются и оцениваются в процессе моделирования движения на основе уравнений (5), (6) или (1)–(4).

### Одновременное цифровое управление положением маятника и тележки

В соответствии с принятой методологией решения данной задачи можно заключить, что для одновременного управления перемещением тележки по  $S(t)$  и переводимого в вертикальное положение маятника необходимо обеспечивать режимы *разгона/0/торможения* путем задания в определенные моменты времени определенных значений  $y_{зад, 1}(t)$  с соответствующим знаком.

Естественно предположить, что реальные процессы управления должны характеризоваться, по крайней мере, наличием ошибки в  $\varphi(t)$  при обработке  $|y_{зад, 1}(t)|$  в вертикальном положении маятника. При этом возможно возникновение соотношения  $\text{sign}(\varphi(t)) \neq \text{sign}(y_{зад, 1}(t))$ , которое противоречит необходимости обеспечения  $H(t) > 0$  или  $H(t) < 0$ . Решение данного вопроса состоит в компромиссном задании такого достаточно малого  $|y_{зад, 1}(t)|$ , при котором с учетом максимальной ошибки обеспечивается *гарантированно* по крайней мере  $\text{sign}(\varphi(t)) = \text{sign}(y_{зад, 1}(t))$ . Большому значению  $|y_{зад, 1}(t)|$  должны соответствовать большие значения  $H(t)$  и, соответственно, более интенсивно реализуемые процессы *разгона/торможения*, т. е. возможно более высокое быстродействие в движениях тележки.

Теперь можно выделить следующие задачи в рамках теоретического и алгоритмического обеспечения синтеза алгоритмов задачи одновременного цифрового управления положением маятника и тележки на основе одного управляющего воздействия:

а) перевод маятника из начального положения в заданное;

б) определение такого значения  $|y_{зад, 1}(t)|$ , при котором гарантированно обеспечивается с учетом ошибки управления  $\varphi(t) \approx y_{зад, 1}(t)$  и  $\text{sign}(\varphi(t)) = \text{sign}(y_{зад, 1}(t))$ ;

в) управление интенсивностью *разгона/торможения* тележки  $S(t)$  (быстродействием при выполнении переходных процессов) путем изменения величины  $|y_{зад, 1}(t)|$  и с учетом пункта б);

г) реализация управления процессом движения  $S(t)$  тележки с выходом на траекторию  $y_{зад, 2}(t)$  с одновременным переводом маятника в вертикальное положение.

Использование методологии оптимизированных дельта-преобразований второго порядка позволяет разрешить перечисленные выше вопросы. В частности, вопрос по пункту а) на теоретическом уровне рассмотрен выше. Решение вопроса по пункту б) базируется на возможности обеспечения гарантированных показателей по точности в установившемся процессе.

Для обрабатываемого в установившемся процессе значения  $\varphi(t)$  максимальная ошибка в соответствии с (11) составляет  $\sim 0,5c_1^*$ ; следовательно, для задающего воздействия необходимо, по крайней мере, выполнение соотношения  $|y_{зад, 1, i}(t)| > 0,5c_1^*$  или

$$|y_{зад, 1, i}| = 0,5bc_1^*, b > 1 (b \approx 2). \quad (19)$$

Управление интенсивностью режима *разгон/торможение* по пункту в) может реализовываться увеличением или уменьшением  $|y_{зад, 1, i}|$  согласно (19).

Управление режимами *разгон/0/торможение*, обеспечивающими перемещение тележки по пункту г) с отработкой задающего воздействия  $S_j \equiv y_{зад, 2, j}$  базируется на введении в алгоритм (17) при  $j = 1$  задающего воздействия  $y_{зад, 1, i} = |y_{зад, 1, i}| \Delta_{2, i}$ . Формировании  $\Delta_{2, i+1}$  и  $\ddot{Y}_{2, i+1}$  при данном  $y_{зад, 2, i}$ .

Рассмотрим оценку значения  $c_2^*$  для алгоритма (17) при определении  $\Delta_{2, i+1}$  и  $\ddot{Y}_{2, i+1}$ . Пусть в соответствии с (19) оценено  $|y_{зад, 1, i}|$ . Тогда используем (16) и имеем

$$|\ddot{Y}_{2, i+1}| = |y_{зад, 1, i}|g. \quad (20)$$

Но  $\ddot{Y}_{j, i+1} = c_j^* \Delta_{j, i+1} / (\nabla t)^2$ ;  $t \in [t_i, t_{i+1}]$  или для  $j = 2$

$$|\ddot{Y}_{2, i+1}| = c_2^* / (\nabla t)^2, \Delta_{2, i+1} \neq 0. \quad (21)$$

Теперь на основе (19), (20) и (21) получаем

$$c_2^* = 0,5bc_1^*g(\nabla t)^2, b > 1 (b \approx 2). \quad (22)$$

Обобщая изложенное выше, следует отметить, что при использовании одного управляющего воздействия (18) процесс управления сопровождается отработкой двух задающих воздействий ( $y_{зад, 1}(t)$  и  $y_{зад, 2}(t)$ ) и реализацией трех переходных процессов:

а) перевод маятника из начального ( $\varphi(t_0)$ ) в вертикальное положение  $y_{зад, 1}(t)$ ;

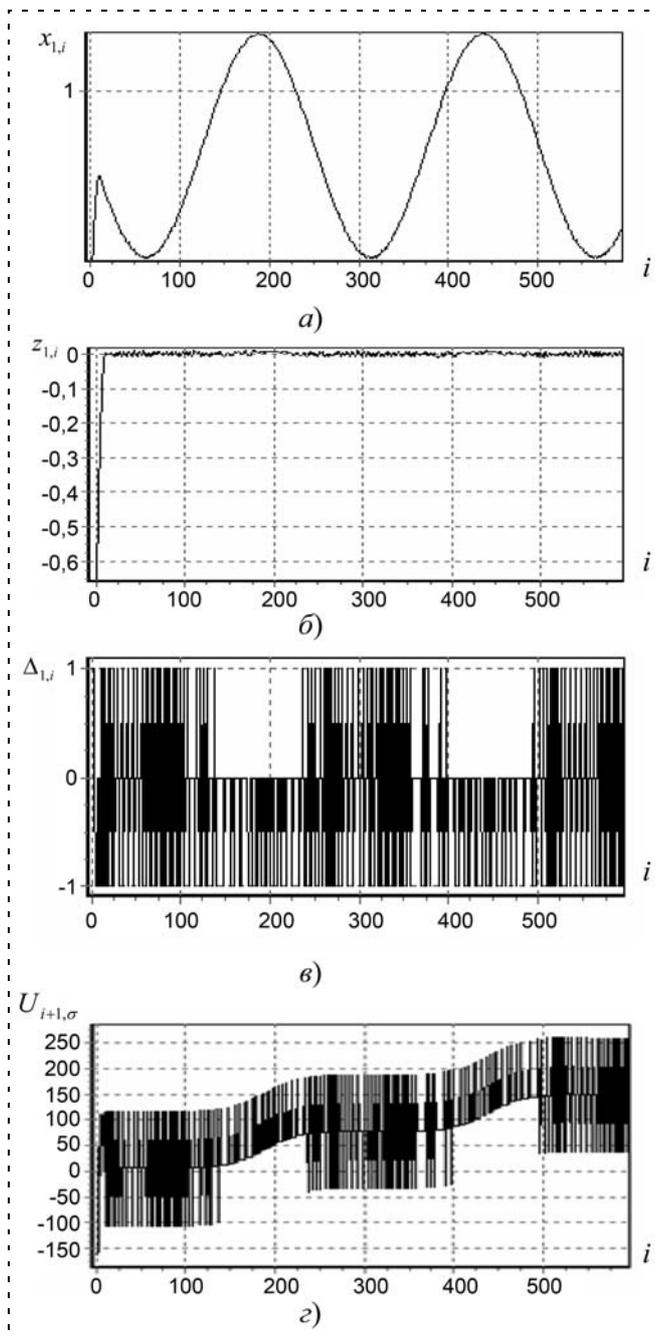


Рис. 2. Временные диаграммы для эксперимента 1

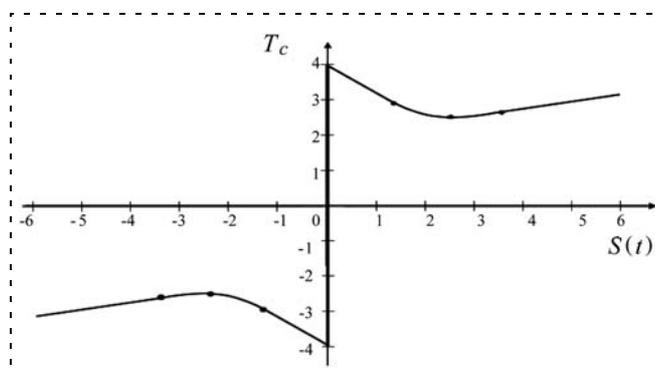


Рис. 3. Функция зависимости силы трения  $T_c = f_{c2}(S(t))$

б) переходы вертикального маятника между положениями  $+|y_{\text{зад}, 1, i}|$  и  $-|y_{\text{зад}, 1, i}|$ ;

в) переход тележки из исходного положения  $S(t_0)$  в заданное или на заданную траекторию  $y_{\text{зад}, 2}(t)$ .

### Результаты экспериментов

Для проведения экспериментов использовали следующие значения постоянных параметров, характеризующих маятник и тележку:  $M = 0,5$  кг,  $m = 0,25$  кг,  $L = 0,3$  м,  $J = 0,03$  кг · м<sup>2</sup>. Значения  $M$  и  $m$  выбраны соизмеримыми по величине, что обеспечивает активное использование компоненты  $H(t)$  в уравнениях движения; в то же время реализация управления при данных соотношениях может приводить к существенному увеличению управляющих воздействий и отклонений тележки при выводе маятника в вертикальное положение по сравнению с использованием сравнительно малых значений  $m$ . Числовые значения времени задаются в секундах, углов — в радианах. Интенсивность действующих сил трения — не слабее, чем, например, в работе [10].

В работе [13] приведены многочисленные эксперименты управления как положением  $\varphi(t)$  маятника без учета расположения тележки, так и при одновременном управлении положением  $\varphi(t)$  маятника и  $S(t)$  тележки с варьированием  $x_{1, 0, 0}$ ,  $\dot{x}_{1, 0, 0}$ ,  $c_1^*$ ,  $\nabla t$ ,  $y_{\text{зад}, 1, i}$ ,  $y_{\text{зад}, 2, i}$ , а также с учетом сил трения.

В рамках данной статьи приводятся отдельные иллюстрации вариантов моделирования.

1. *Эксперимент 1.* На рис. 2 представлены результаты модельного эксперимента по управлению положением  $\varphi(t)$  маятника без учета расположения тележки с изменяющимся в пределах  $5,73 \div 74,49^\circ$  гармоническим задающим воздействием  $y_{\text{зад}, 1, i} = 0,7 - 0,6\sin(2,5t_i)$  при следующих исходных данных:  $x_{1, 0, 0} = 0$ ;  $\dot{x}_{1, 0, 0} = 0$ ;  $\dot{x}_{2, 0, 0} = 0$ ;  $c_1^* = 0,025$ ;  $\nabla t = 0,01$ ;  $r = 4$ ;  $f_p^* = f_p = 0$ ;  $T_c(t) = 2,0\dot{x}_2(t)$ ;  $T_{c, i+1, \sigma}^* = 2,0\dot{x}_{2, i+1, \sigma}$ . На рис. 2, а показаны переходный и установившийся процессы координаты  $x_{1, i}$ ;

на рис. 2, б — ошибка управления; на рис. 2, в — последовательность дельта-признаков  $\Delta_{1, i}$ ; на рис. 2, г — управляющее воздействие  $U_{i+1, \sigma}$ .

При движении по задающей непрерывно изменяющейся траектории, по крайней мере, на протяженных участках, должны быть согласованы максимальные значения модулей второй производной задающего воздействия и кванта преобразования [13].

2. *Эксперимент 2.* Перевод маятника из положения  $x_{1, 0, 0} = 3,14$  ( $\varphi(t_0) \approx 180^\circ$ ),  $\dot{x}_{1, 0, 0} = 0$  в вертикальное и перемещение тележки в исходное положение при наличии нелинейного трения ( $x_{2, 0, 0} = 0$ ;  $\dot{x}_{2, 0, 0} = 0$ ;  $c_1^* = 0,075$ ;  $\nabla t = 0,05$ ;  $|y_{\text{зад}, 1, i}| = c_1^*$ ;

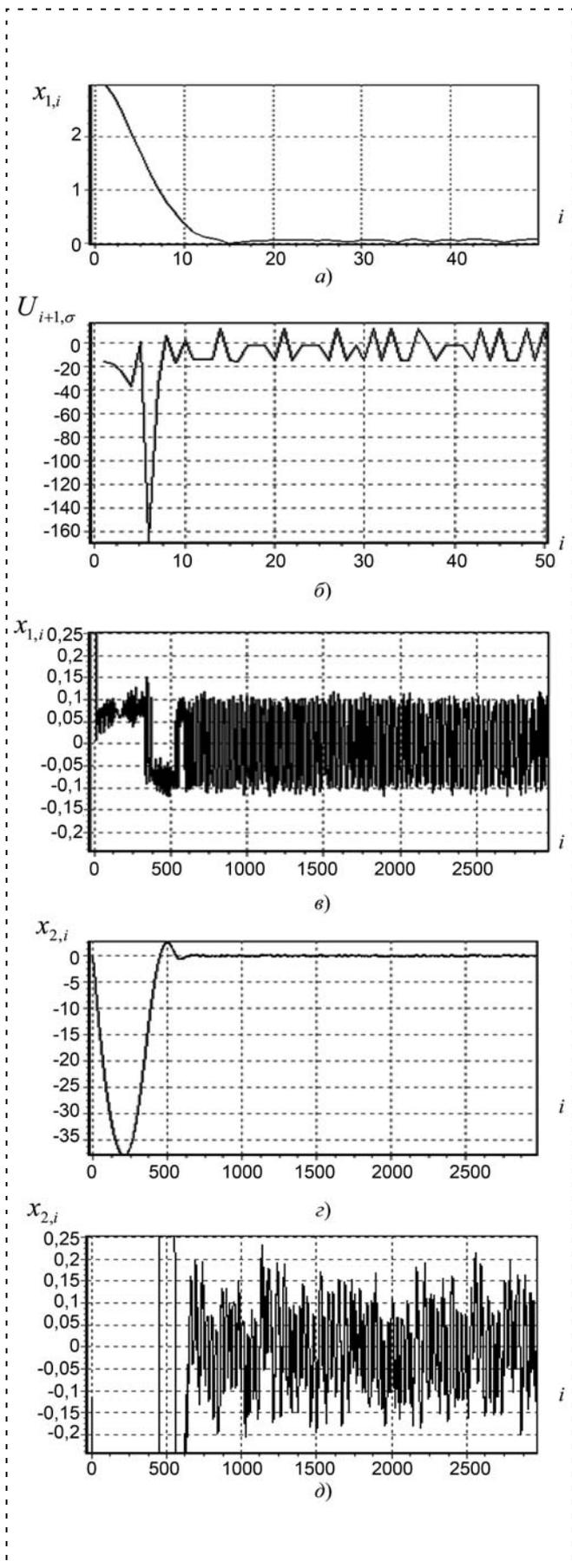


Рис. 4. Временные диаграммы для эксперимента 2

$|y_{зад,2,i}| = 0; f_p^* = f_p = 0,02; T_c(t) = f_{c2}(|\dot{x}_2(t)|)\text{sign}(\dot{x}_2(t));$

$T_{c,i+1,\sigma}^* = 2,0; r = 4$ ). Функция  $T_c(t) = f_{c2}(\dot{S}(t))$  представлена на рис. 3.

На рис. 4, а показано поведение  $x_{1,i}$  ( $R_{пер} \approx 14; T_{пер} \approx 0,7$  с); на рис. 4, б — управляющее воздействие  $U_{i+1,\sigma}$  ( $N = 50$ ); на рис. 4, в —  $x_{1,i}$  в увеличенном масштабе ( $|z_{1,i}| \approx 0,12; i > 14$ ); на рис. 4, г — переходный и установившийся процессы координаты  $x_{2,i}$ ; на рис. 4, д — поведение  $x_{2,i}$  в увеличенном масштабе.

### Заключение

Принятые в начале данной статьи исходные положения по решению рассматриваемой задачи выполняются в широких пределах изменения используемых при синтезе параметров (в пределах допустимых возможностей методологии оптимизированных дельта-преобразований второго порядка). При проведении экспериментов не ставилась задача получения наилучших отдельных или комплексных конечных качественных характеристик, представляющих интерес для сравнения с другими методологиями решения данной задачи, так как данный вопрос является самостоятельным и должен решаться в единых условиях исходной постановки задачи синтеза.

Обобщая приведенные в данной статье результаты, а также учитывая экспериментальный материал работы [13], можно сделать следующие основные заключения.

Для маятника гарантированные оценки длительности переходных и ошибки установившихся процессов при линейно изменяющихся задающих воздействиях  $u_{зад,1,i}$  и отсутствии трения соответствовали гарантированным оценкам (11), (12), характеризующим оптимизацию по быстродействию и точности. Обеспечивается работоспособность алгоритмов управления маятником и тележкой и при более сложных, например гармонических, задающих воздействиях.

Качественные характеристики тележки формируются в условиях действия возмущений, связанных с переходными процессами в движении маятника при обработке  $\pm|y_{зад,1,i}|$ ; варьирование параметров алгоритма дельта-преобразования и значения  $|y_{зад,1,i}|$  позволяет получать различные характеристики тележки по быстродействию, точности, отклонению траектории от заданной. В частности, полученные значения ошибки в установившемся процессе для  $S(t)$  при  $|y_{зад,1,i}| = 0,05$  рад оцениваются как  $|z_{2,i}| \approx 0,15$  м. Графики переходных процессов для  $S(t)$  по длительности приблизительно соответствуют оценке (12).

Введение в рамках принятых ограничений сил трения, а также допустимое ограничение модуля управляющего воздействия  $\mu(t)$ , как правило, не

приводили к существенному ухудшению качественных показателей по быстродействию и точности, обеспечивались близкие к гарантированным оценкам показатели качества, что обуславливается, в первую очередь, проявлением грубости алгоритмов управления. В то же время, в условиях ограничения модуля управляющего воздействия, а также с увеличением  $|y_{зад, i, i}|$  уменьшается откат и длительность переходного процесса тележки, инициированные переходным процессом маятника. При проведении экспериментов введение дополнительной дискретизации ограничивалось, как правило, значением параметра  $r \leq 4$ .

Приведенное решение непростой известной задачи показывает, что методология синтеза алгоритмов цифрового управления с использованием оптимизированных дельта-преобразований второго порядка, отличающаяся существенной простотой, и в дальнейшем может быть перспективна для решения проблем управления сложными подвижными нелинейными объектами.

#### Список литературы

1. Алексаков Г. Н., Гаврилин В. В., Федоров В. А. Структурные модели динамических процессов. М.: МИФИ, 1989.
2. Ропштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации. URL: <http://matlab.expone.ru/fuzzylogic/book5/references.php>
3. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Теория и практика: Учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

4. Голубев Ю. Ф. Оптимальное по быстродействию управление перемещением неустойчивого стержня // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 5. С. 42–50.
5. Гришин А. А., Ленский А. В., Охоцимский Д. Е., Панин Д. А., Формальский А. М. О синтезе управления неустойчивым объектом. Перевернутый маятник // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 14–24.
6. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
7. Колесников А. А., Кондратьев И. В. Синергетическое управление механической системой "перевернутый маятник на тележке": линейное преобразование координат // Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Синергетика и проблемы управления. Таганрог: ТРТУ, 2001. № 5 (23). С. 162–174.
8. Решмин С. А., Черноусько Ф. Л. Оптимальное по быстродействию управление перевернутым маятником в форме синтеза // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2006. № 3. С. 51–62.
9. Dotoli M., Maione B., Naso D., Turchiano B. Fuzzy Sliding Mode Control for Inverted Pendulum Swing-up with Restricted Travel // Proc. of FUZZ-IEEE 2001 — the 10-th IEEE Conference on fuzzy systems, Australia (2001).
10. Tao C. W., Taur J. S., Wang C. M., Chen U. S. Fuzzy hierarchical swing-up and sliding position controller for the inverted pendulum — cart system // Internat. J. Fuzzy Sets and Systems. 159 (2008). P. 2763–2784.
11. Стил Р. Принципы дельта-модуляции / Под ред. В. В. Маркова. М.: Связь, 1979.
12. Венедиктов М. Д., Женецкий Ю. П., Марков В. В., Эй-дус Г. С. Дельта-модуляция. Теория и применение. М.: Связь, 1976.
13. Кравченко П. П. Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка. Теория и применение. М.: Радиотехника, 2010. 288 с.
14. Павлов А. А. Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию. М.: Наука, 1966.



**Всероссийская  
научно-техническая конференция  
«ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»**  
в рамках XVI Международного форума  
«РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК»

**25-26 сентября 2012 года**

**ВК «ЛЕНЭКСПО», Большой пр. В.О., 103  
ЦНИИ РТК, Тихорецкий пр., 21  
Санкт-Петербург**

**ПЕРВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ**

**Организатор конференции**

- ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

**При поддержке**

- Минобороны России
- МЧС России
- Роскосмоса
- ОЭМПУ РАН
- Ассоциации ГНЦ «Наука»
- Правительства Санкт-Петербурга
- СПП СПб
- ОАО ВК «ЛЕНЭКСПО»

**Председатель программного комитета:**  
д.т.н., профессор Евгений Иванович Юревич  
Тел.: (812) 5524544;  
e-mail: [yurevich@rtc.spbstu.ru](mailto:yurevich@rtc.spbstu.ru)

**Секретариат конференции:**  
Тел.: (812) 5524162;  
e-mail: [mrspsb@rtc.ru](mailto:mrspsb@rtc.ru)

**Тематика конференции**

- **Робототехника для экстремальных условий и чрезвычайных ситуаций**  
Мониторинг, инспекция, технологические операции. Ликвидация последствий аварий и катастроф. Космическая робототехника. Морская робототехника. Специальная мини- и микроробототехника.
- **Военная и антитеррористическая робототехника**  
Боевые, боевого обеспечения и антитеррористические робототехнические системы. Разведка, разминирование, охрана, спасательные и транспортные операции.
- **Медицинская робототехника**  
Оказание первой помощи. Обслуживание больных и инвалидов, их реабилитация. Микророботы для обследования и лечения внутренних органов.

*Подробная информация о конференции на сайте: <http://er.rtc.ru/>*

УДК 621.865.8; 382.049.77

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

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет,  
нач. отдела, ОАО "Корпорация "Аэрокосмическое  
оборудование", Санкт-Петербург

## **Адаптивная автоматизация деятельности оператора в среде иммерсивного интерфейса мехатронного подвижного объекта**

*Рассматриваются вопросы инженерно-психологического проектирования деятельности оператора мехатронного подвижного объекта (МПО) в рамках классической психологической теории деятельности. Исследуются вопросы адаптивной автоматизации в средах виртуального иммерсивного интерфейса. Выделены основные проблемы проектирования деятельности оператора МПО. Показаны направления развития методов адаптивной автоматизации МПО на базе технологии индуцированных виртуальных иммерсивных сред.*

**Ключевые слова:** виртуальный интерфейс, деятельность, деятельностный подход, иммерсивный интерфейс, мехатроника, эргатические системы, человеко-машинный интерфейс

### **Введение в проблему автоматизации мехатронных подвижных объектов**

Мехатронная парадигма сегодня является доминирующей в современном машиностроении и нацелена на проектирование и производство качественно новых машин с модульной и сетевой структурой и архитектурой на основе системной интеграции механических узлов с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами и межсистемной сетевой целевой самоорганизацией.

В рамках мехатронного подхода проблематика автоматизации технических систем выходит за методологические рамки современной автоматики, переходя в область сложных эргатических систем, и нуждается в надлежащих фундаментальных исследованиях.

К особой категории мехатронных систем, объединенных в общий класс мехатронных подвижных объектов (МПО), следует отнести различные типы управляемых подвижных объектов, включающие мехатронные узлы и модули. Это автономные транспортные средства (автомобили-роботы, робокары), мобильные промышленные и боевые роботы, экзо-

скелетоны, телеуправляемые аппараты (сухопутные, подводные, воздушные), иммерсивные системы с искусственными интерфейсными средами и др. Проблемы их автоматизации целесообразно рассматривать и решать с единых позиций — на общей теоретической платформе.

Общим во всех системах рассматриваемого класса является присутствие в контуре управления человека, выполняющего функции человека-оператора, человека-пользователя, проектировщика. Степень участия человека в обеспечении эффективности мехатронной системы, включенности в нее является основанием для классификации МПО.

По степени участия человека в процессах управления мехатронные объекты подразделяются на автоматические и автоматизированные (интерактивные). В первом случае выполнение всех рабочих функций осуществляется без участия оператора, а во втором — с его участием, которое реализуется посредством эргатических функций информационно-управляющей системы (ИУС). Широкий класс задач управления МПО следует относить к проблематике эргатических систем управления (ЭСУ), в которых в процессе реализации целевой функции системы непосредственно (посредством интерфейса) или опосредованно (посредством коммуникации и в проектировании) участвует человек.

Человек-оператор (ЧО) в ЭСУ МПО, взаимодействуя с техническими средствами, выполняет функции целеполагающего характера и осуществляет супервизорное управление подвижным объектом, а также непрерывное или корректирующее управление движением в ручном или полуавтоматическом режимах. В условиях компьютеризации ЭСУ МПО в процессах автоматизированного управления наряду с *супервизорным* также выделяют *диалоговые* режимы: в первом случае ЧО осуществляет наблюдение за работой автоматики и ограничивается оперативным вмешательством в целях ее коррекции, а во втором осуществляется непосредственное через системы интерфейса взаимодействие ЧО и компьютера. К особой форме диалогового управления относится участие оператора в коммуникативных процессах, возникающих в процессе управления МПО.

Многие МПО сочетают все формы управления и взаимодействия с человеком, применяя их на тех или иных участках рабочего и жизненного цикла изделия. В силу этого МПО можно отнести к управлению с *комбинированными формами участия*. Например, в беспилотных летательных аппаратах мы видим непосредственное управление на этапах из-

менения маршрута, при оценке ситуации, принятии решения, автоматическое на этапе работы автопилота, супервайзерское при наблюдении и корректировке режимов бортовой автоматики и систем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и т. д.

### Деятельностный подход в мехатронике

Деятельностный подход как монистическая форма объяснения работы психического механизма человека родился в рамках советской психологии на базе представлений марксистской философии об активности человека, объективности и единстве мира (А. Н. Леонтьев, П. Я. Гальперин, В. В. Давыдов, С. Л. Рубинштейн, Г. В. Суходольский, Н. В. Талызина, и др.). Теория деятельности в психологии по В. В. Давыдову содержит следующие положения:

- предметом психологии является целостная деятельность субъекта;
- генетически исходной и основной является внешняя, предметная, чувственно-практическая деятельность, от которой производны все виды внутренней психической деятельности индивидуального сознания: обе эти формы имеют общественно-историческое происхождение и принципиально общее строение;
- основными и взаимно превращающимися единицами (или "составляющими" деятельности являются, с одной стороны, *потребность—мотив—цель—условия*, с другой — *деятельность—действия—операции*;
- главные процессы деятельности — интериоризация и экстериоризация ее внутренней формы "как опредмечивание образа, как его переход в объективно идеальное свойство предмета";
- конституирующей характеристикой деятельности является предметность; первоначально деятельность детерминируется предметом, а затем она опосредуется и регулируется его образом как своим субъективным продуктом;
- предметная детерминация деятельности возможна благодаря ее особому качеству — универсальной пластичности, уподобляемости свойствам, отношениям и связям объективно-предметного мира;
- предметный характер деятельности реализуется через нужду субъекта, переходящую в потребность, и через поисковые, опробывающие действия, имеющие функцию уподобления;
- деятельность и ее составляющие дробятся и укрупняются, соответственно ориентирующие их субъективные образы дифференцируются и интегрируются;
- все это альтернативно схеме реактивного поведения;
- метод психологического анализа деятельности человека направлен на выявление ее конкретно-исторической природы, ее строения, пред-

метного содержания и взаимопереходов ее форм и "составляющих", происходящих в соответствии с их системными связями и отношениями [8, С. 114].

Основные принципы психологического анализа в теории деятельности по А. Г. Асмолову (ее более поздней редакции) следующие:

1. Принцип предметности как оппозиция принципу стимульности.
2. Принцип активности как оппозиция принципу реактивности.
3. Принцип неадаптивной природы предметной деятельности человека как оппозиция принципу адаптивности.
4. Принцип опосредования как оппозиция принципу непосредственных ассоциативных связей.
5. Принцип интериоризации-экстериоризации как оппозиция принципу социализации в зарубежной психологии.
6. Принцип психологического анализа "по единицам" как оппозиция принципу анализа "по элементам".
7. Принцип зависимости психического отражения от места отображаемого объекта в структуре деятельности [1, С. 53].

Деятельностный подход требует рассмотрения всех участников деятельностного процесса в качестве целостности, изменения одних частей которой ведут к изменениям в других. Это своего рода алгоритмическое представление системы с разнокачественными элементами.

Деятельность оператора в эргатической системе состоит в управлении посредством интерфейса техническими устройствами, которые осуществляют непосредственное воздействие на объект деятельности вместо человека. В силу алгоритмического характера деятельности оператора при ее проектировании необходимо учитывать все наиболее вероятные ситуации управления техническим устройством, что для сложных систем представляет значительную проблему. В задачи оператора входит построение адекватных образно-концептуальных моделей этих ситуаций, владение информационной моделью и умение справляться с каждой из них. В информационной модели объект деятельности отображается в знаковой форме. Одна из особенностей операторской деятельности состоит в том, что ему приходится опознавать знаки, соотносить их с собственными представлениями о реальном объекте деятельности. Оператор является лицом, ответственным за успешный результат воздействия на объект и нормальную работу технического устройства. Это обстоятельство должно учитываться при разработке современных МПО, в особенности систем с элементами искусственного интеллекта. Эти устройства выполняют важные, но не решающие функции, которые в эргатической системе принадлежат оператору.

Задача проектирования деятельности оператора МПО, по нашему мнению, заключается в создании и технологической реализации редуцированной формы среды деятельности, порождающей оперативный образ, в которой ресурсов оператора гарантированно достаточно для выполнения профессиональной задачи.

### **Парадигмы проектирования эргатических МПО с системами автоматизации в рамках деятельностного подхода**

Существующие парадигмы инженерно-психологического проектирования связаны с ролью человека в эргатической системе. Развитие инженерной психологии как специфической формы знания, отражающей в традициях советской психологии *информационно-деятельностный* взгляд на человека как элемента системы "человек — машина" (социотехнической системы), породило особую форму проектной деятельности — *инженерно-психологическое проектирование*.

Впервые данный термин был введен Б. Ф. Ломовым и обозначал проектирование деятельности человека в технической системе. Задача проектировщика состояла в создании проекта деятельности человека и в определении на его основе требований к техническим устройствам, необходимым для ее осуществления [9]. Концепция инженерно-психологического проектирования, несмотря на свою внешнюю простоту и привлекательность, оказалась довольно противоречивой и породила целый ряд вариантов, различающихся своими методологическими основами и взглядами на роль человека в технической системе. Основные из них: антропоморфная [5]; включения [7]; процессуальная [12]; взаимной адаптации человека и техники [16]; анализа и многоуровневой адаптации человека и машины [2]; активного оператора [6, 11]; деятельностно-центрическая или системоцентрическая [10] концепции инженерно-психологического проектирования.

Каждое из указанных концептуальных направлений позволяет решать задачи проектирования определенного класса человеко-машинных систем и тем более эффективно, чем ближе деятельность человека в них напоминает или является деятельностью по выполнению заранее заданного алгоритма управления, не предъявляющего особых требований к психофизиологическим структурам человеческой памяти и восприятия. Это широко распространенный среди МПО класс потоковых систем, связанный с манипулятивным управлением при заданных временных ограничениях. К ним относятся системы управления транспортными средствами, энергетическими установками, судовыми двигательными установками, системы диспетчерского типа, автоматизированные системы управления и др.

В начальном периоде эволюции технических систем большую роль играл *машиноцентрический подход*, в соответствии с которым человек рассматривается как звено технической системы, решающее ту или иную ее задачу. Описание оператора осуществляется в терминах анализа технических средств. Определяются "входные" и "выходные" параметры человека, составляется его передаточная функция. Задачей исследователя является поиск некоторых констант, не зависящих от условий работы человека. Такой подход оказался малопродуктивным при анализе сложных систем, так как поведение человека в них осуществляется сложным, плохо формализуемым образом.

Возникла необходимость в развитии новых подходов, и появился сформулированный Б. Ф. Ломовым *антропоцентрический подход*. Суть данного подхода заключается в том, что машина является орудием труда, с помощью которого осуществляется деятельность человека. При этом главным становится проектирование деятельности "человека — оператора". Проект деятельности выступает основой для решения задач проектирования системы. Несмотря на внешнюю привлекательность данного подхода, долгий период его развития поставил под сомнение его эффективность. Дело в том, что одного психологического знания оказалось явно недостаточно для того, чтобы возглавить проектирование сложных технических систем на всех уровнях их создания и эксплуатации. Многие инженерно-психологические проекты носили явно декларативный характер, не подкрепленный технологически. Современные технологии позволяют вновь обратиться к понятиям антропоцентризма, но в искусственных виртуальных средах, проектируемых под психологические свойства оператора.

Одновременно с антропоцентрическим подходом появился *системно-технический* подход, в котором роль человека и техники уравниваются. Однако и он не получил должного развития, но уже по причине низкой психологической грамотности инженеров, что проявлялось в игнорировании ими психологического знания.

Мягкой формой антропоцентрированной методологии явился *человекоориентированный* подход к проектированию П. Я. Шлаена и В. М. Львова [17], в котором постулируется необходимость учета возможностей человека в системе, но, главным образом, на первых этапах ее проектирования. Далее осуществляется эргономический контроль процесса разработки системы, оценка ее эргономичности.

Деятельностные подходы инженерно-психологического проектирования широко распространены в инженерной среде эргономического направления, работающего с предметной средой естественного мира [3]. К ним относятся и МПО.

## Концепции адаптивной автоматизации в МПО с виртуальным индуцированным иммерсивным интерфейсом

В связи с развитием систем виртуального интерфейса и связанной с ними теории иммерсивных индуцированных сред [15] приобретает значение подход *кооперативной автоматизации*, реализующий идеологию *адаптивной автоматизации*, заключающаяся в динамическом распределении функций между человеком и автоматической частью системы. Цель данного подхода — создание кооперативной среды, в которой человек и машина работают как партнеры, дополняя друг друга [18].

Однако несмотря на привлекательность данной модели ее практическая реализация встречается с рядом трудностей, связанных с возможностью построения алгоритмов работы машинной части интерфейса, формирующей кооперативную среду. В большинстве известных сложных системах МПО это сводится к реализации режимной формы организации достижения цели. Так, в авиации типовой полет разбивается на режимы взлета, достижения района действия, выполнения задачи, возвращения и посадки. В каждом из них оператор имеет дело с отдельной рабочей средой и соответствующей ей средой интерфейса. Слабым местом режимной формы организации является появление моментов перехода оператора от одной формы деятельности к другой и связанных с ними процессов вработки, во время которых резко падает качество деятельности оператора и системы в целом.

Ряд зарубежных авторов склоняется к *антропоцентрическим* моделям *адаптивной автоматизации*, в которых предлагаются следующие принципы:

1. Человек-оператор играет ведущую роль в управлении системой.

2. Он одновременно и наблюдатель, и контролер в системе.

3. Автоматика должна адаптироваться к когнитивным возможностям человека и его умственной нагрузке [3, 4].

В качестве направления проектирования предлагается создание интеллектуального интерфейса. Однако следует признать, что адаптивная автоматизация — это совсем не простая задача. Для ее решения необходимо:

1. Решить проблему управления динамическим распределением функций контроля между оператором и автоматизированной системой, при сохранении обязанности у оператора поддерживать основную системную задачу. Это одна из основных проблем, ведущая к неудачам в проектировании систем адаптивной автоматизации, рассматривающих в качестве критерия автоматизации рабочую нагрузку на оператора.

2. Определить, как в соответствии с концепцией адаптивной автоматизации создать человеко-ком-

пьютерные интерфейсы, направленные на поддержку процессов эффективной автоматизации человеческого общения.

3. Оценить влияние вариантов реализации концепции адаптивной автоматизации на межличностные взаимодействия экипажа в системах управления [19].

*Scerbo* предположил, что успех адаптивной автоматизации будет в значительной степени определяться системами интерфейса, которые включают в себя все методы обмена информацией (например, зрительные, слуховые, тактильные и др.) [22].

В дополнение к эффектам влияния на процесс адаптивной автоматизации рабочей нагрузки необходимо также учитывать воздействия на оператора человеко-машинного интерфейса. Его конкретная реализация может внести дополнительные сложности в систему МПО. Следовательно, необходимы интерфейсы, которые обеспечивают борьбу с этой сложностью, расширяют, а не препятствуют производительности системы. Введение режимов адаптивной автоматизации требует дополнительного внимания к разработке интерфейсов, которые поддерживают возможности оператора в управлении системой различными способами, в том числе и реализуют способность переходить с автоматического управления на ручное и обратно. Необходимо обеспечить обмен информацией в системе без дополнительных необоснованных когнитивных усилий оператора по ее переработке [21].

Технологической базой для решения рассматриваемых проблем может служить технология виртуальной реальности и ее приложения в виде *индуцированных иммерсивных виртуальных интерфейсов* [13, 15]. Они позволяют осуществить полимодальный контакт оператора с управляющей средой, погружение в которую дает возможность осуществлять эффективную деятельность по управлению эргатической системой. Рассмотрим подробнее данный вариант интерфейса МПО и основные положения теории индуцированных сред.

*Под средой человеко-машинного интерфейса понимаются порождаемая технико-технологическими и инженерно-психологическими решениями, в их динамическом единстве и целостности с психофизиологической системой оператора, действительность и факторы, ее обеспечивающие, позволяющие оператору получить и реализовать свой профессиональный опыт для осуществления эффективной профессиональной деятельности* [13].

Техническая среда виртуального интерфейса как совокупность технико-технологических и программно-аппаратных решений отличается от виртуальной среды, генерируемой данными средствами. Именно в виртуальной среде происходит профессиональная деятельность оператора. Она является перцептивной копией некоторого искусственного мира, отображаемого в субъективной сфере чело-

века в форме действительности [15]. Содержание этого мира определяет эффективность деятельности оператора и создается методами инженерно-психологического проектирования. Важные качества виртуальных интерфейсов — возможность управления всеми параметрами виртуальной среды с использованием реализованного в ней естественного интерфейса и интеллектуальное управление содержанием виртуальной среды, что делает виртуальные интерфейсы идеальной технологией для реализации концепций адаптивной автоматизации МПО. Важным фактором взаимодействия в виртуальной среде является появление у оператора *чувства присутствия*.

"Присутствие" (*"Presence"*) — субъективное понятие, которое в общем смысле определяется как субъективный опыт человека находиться в одном месте или окружающей среде, в то же время физически находясь в другом месте [23]. Присутствие связано с преодолением машинно-генерируемой среды, а не с фактическим физическим местом действия. Это психологическое состояние воспринимать себя окутанным, вовлеченным, включенным во взаимодействие с окружающей средой, обеспечивающей непрерывный поток стимулов и опыта. Присутствие связано также с возможностью получения субъектом диалогового опыта деятельности в среде. Опыт присутствия ведет к появлению у оператора "чувственной иллюзии непосредственности" [20].

В виртуальной реальности имеется возможность воздействовать практически на все элементы моделируемого мира и осуществлять это естественным образом. При этом мир отвечает на воздействия своим изменением, доступным сенсорным системам оператора. Основное достоинство иммерсивного интерфейса — сведение интеракций к формам, понятным сенсорным и исполнительным системам человека, к его непосредственным действиям с элементами моделируемой среды без промежуточных операций, включающих логические и языковые конструкции. Иммерсивный интерфейс погружает человека в искусственный мир, который, в свою очередь, может быть связан с реальным физическим миром, отображая в своем предметном, пространственном и временном содержании его основные свойства. Манипуляция в иммерсивном интерфейсе естественна в отличие от таковой, реализуемой в классических формах парциального интерфейса, в которых, например, при решении задачи наведения управляемого объекта на цель в пространстве оператор вынужден с помощью органов управления в виде маховичков синхронно правой и левой рукой совмещать координаты объекта и цели, решая задачу компенсаторного слежения. Это довольно сложная сенсомоторная задача. В иммерсивном интерфейсе достаточно "взять" в виртуальном пространстве виртуальную модель объ-

екта и "перенести" ее в контур цели, тем самым совершив наведение на нее. Трансформация реального мира в мир виртуальной реальности и свойств реального мира в свойства виртуального мира осуществляются без участия человека, что позволяет освободить последнего от сложных операций пространственно-временных преобразований. Искусственный мир может быть подстроен с помощью транслятора состояний под динамические свойства оператора, освобождая его от необходимости работы в дефиците времени. Снимаются и другие формы психологических и психофизиологических ограничений.

В работе [13] представлен ряд возможных вариантов построения интерфейсов МПО, использующих индуцированные виртуальные среды для решения практических задач в зависимости от содержания отношений "генерируемая среда — реальная среда", "управляемый объект — индуцированная копия управляемого объекта" и интерактивных свойств интерфейса:

♦ **системы с "тождественным отображением"** — генерируемая в них виртуальная среда точно повторяет эволюцию и содержание "реальной среды", а "виртуальная копия управляемого объекта" повторяет наблюдаемое поведение реального управляемого объекта, подчиняющегося командам оператора.

Вариантом МПО данного класса являются классические системы дистанционного управления. Они позволяют вывести оператора из опасной рабочей зоны (работа с радиоактивными и взрывчатыми веществами, агрессивными средами, участие в боевых действиях), исключить действие экстремальных физических факторов (перегрузок, невесомости, пониженного и повышенного давления среды, загазованности, воздействия ударной волны), избежать длительного срока доставки оператора до места деятельности (межпланетные перелеты);

♦ **системы "слежения в неоптических диапазонах"** являются вариантом систем с тождественным отображением. В них в качестве источника информации об объекте наблюдения используются данные о положении маркеров систем телеметрии, расположенных на управляемом объекте. *Основная проблема* — выделение и генерация параметров фона, который может присутствовать в виртуальной сцене в виде синхронизируемого фона (создается в реальном времени с использованием информации из естественной среды) или в его фиксированной, использующей абстрактную, не связанную с естественной средой, форме;

♦ **системы, "фильтрующие отображение"** — в генерируемой среде повторяются только важные для выполнения профессиональной задачи элементы "реальной среды", объекты управляются синхронно. Данный класс систем позволяет освободить оператора от необходимости восприятия ненужной и

вредной для осуществления деятельности информации. Это могут быть задачи слежения за эволюцией объекта на сложном маскирующем фоне или управления в условиях сильных помех анализаторным системам оператора. *Основные проблемы* связаны с определением необходимого содержания индуцированной сцены;

♦ **системы, "реконструирующие отображение"** — в генерируемой среде создается объект, обладающий иной, нежели реальный объект управления (наблюдения) перцептивной формой, но он синхронизирован с ним по основным рабочим признакам реального объекта. Например, сложный физический объект заменяется в виртуальной среде на аналог, обладающий визуальными свойствами, помогающими обеспечить оптимальные условия наблюдения и работы с ним. *Проблема проектирования* — выделение признаков и вида реконструкции, достаточных и способствующих выполнению целевой задачи;

♦ **системы с "профессионально-ориентированным отображением"** — генерируемая среда наполняется дополнительным по отношению к реальной среде содержанием, способствующим выполнению профессиональной задачи. Это могут быть, например, вводимые в содержание генерируемой среды объекты, содержащие справочные материалы и подсказки. Полезно включение в наблюдаемые признаки объектов дополнительных модальностей, таких как изменение цвета, формы и размеров объекта, его динамических свойств в случае повышения его опасности, изменение свойств ландшафта, освещенности, включение висячих списков, пиктограмм и т. д. Возможно и введение в пространство виртуальной среды анимированных персонажей, несущих различную ролевую нагрузку, помогающую оператору принять правильное решение;

♦ **системы "интерактивного наблюдения"** — данный класс систем погружает оператора в специально организованную аудиовизуальную виртуальную среду, интегрирующую в своем пространстве наблюдаемые объекты и средства работы с ними. Примером такой индуцированной среды может быть система наблюдения за воздушным пространством. *Основные проблемы* — определение формы и содержания среды и сценарии деятельности в среде;

♦ **системы "с интеллектуальным конструированием мира"** — индуцированная среда в данном виде систем представляет собой полностью искусственное образование в виде трехмерной реальности, связанное системами трансфера с реальным миром, из которого в процессе анализа выделяется содержание, несущее целевое назначение в соответствии с назначением системы, на основе которого создаются средства, конструирующие содержание среды. Оператор посредством интерфейса, который тоже

может быть модифицирован, осуществляет работу с системой в рамках текущей задачи.

Методология эргономического проектирования индуцированных виртуальных сред связана с решением следующих основных задач:

- инженерно-психологический анализ деятельности оператора в индуцируемой среде;
- разработка проекта индуцируемой среды в виде функционально-структурной декомпозиции: мир, события, сцены, ситуации, объекты, признаки;
- анализ влияния деятельности оператора в индуцируемой среде на реальную среду;
- определение содержания и вида связей между индуцированной и реальной средами;
- определение психологического содержания деятельности оператора, выбор и оценка вариантов сред;
- разработка не индуцированного и индуцированного сценариев и их синхронного развития;
- определение предметно-ситуативного содержания среды в соответствии со сценариями;
- построение концепции создания модели реальной среды, описывающей подмножество ее элементов и их характеристик, необходимых для создания адекватной (по заданному критерию) перцептивной копии этой среды;
- исследования феноменов погружения оператора в индуцированную виртуальную среду и некоторых видов взаимодействия с объектами в индуцированной среде (в частности, визуального и тактильного).

Применение технологий виртуальной реальности при создании рабочих иммерсивных сред позволяет перейти к проектированию систем интерфейса, обеспечивающих эффективное функционирование человека-оператора в системах МПО с адаптивной автоматизацией процессов управления.

#### Список литературы

1. Асмолов А. Г. Культурно-историческая психология и конструирование миров. М.: Воронеж, 1996.
2. Ванда В. Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990.
3. Голиков Ю. Я. Методология психологических проблем проектирования техники. М.: ПЕРСЭ, 2003.
4. Голиков Ю. Я. Концепции адаптивной автоматизации и подходы к человеку и технике для современных человеко-машинных комплексов // Психология адаптации и социальная среда: современные подходы, проблемы, перспективы. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2007. С. 392—408.
5. Дубровский В. Я., Щедровицкий Л. П. Проблемы системного инженерно-психологического проектирования. М.: Изд-во МГУ, 1971.
6. Завалова Н. Д., Ломов Б. Ф., Пономаренко В. А. Принцип активного оператора и распределение функций между человеком и автоматом // Вопросы психологии. 1976. № 3. С. 3—12.
7. Крылов А. А. Человек в автоматизированных системах управления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973.
8. Леонтьев А. А. Деятельный ум (Деятельность, Знак, Личность). М.: Смысл, 2001.

9. Ломов Б. Ф. Состояние и перспективы развития психологии в СССР в свете решений XXIV съезда КПСС // Вопросы психологии. 1971. № 5. С. 3—19.

10. Пископель А. А., Вучетич Г. Г., Сергиенко С. К., Шедровицкий Л. П. Инженерная психология: дисциплинарная организация и концептуальный строй. М.: ИД "Касталь", 1994.

11. Пономаренко В. А., Завалова Н. Д. Принцип активного оператора в автоматизированных системах управления // Авиационная психология. М.: Ин-т авиационной и космической медицины, 1992. С. 87—99.

12. Инженерно-психологическое проектирование АСУ / А. И. Прохоров, Б. А. Смирнов, Е. М. Хохлов и др. Киев: Будивельник, 1973.

13. Сергеев С. Ф. Эргономические проблемы проектирования интерфейса на базе индуцированных виртуальных сред // Мир Авионики. 2006. № 3. С. 62—67.

14. Сергеев С. Ф. Методология эргономического проектирования систем искусственного интеллекта для самолетов 5-го поколения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 11. С. 6—11.

15. Сергеев С. Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. М.: Народное образование, 2009.

16. Суходольский Г. В. Основы психологической теории деятельности. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988.

17. Шлаен П. Я., Львов В. М. Эргономика для инженеров: Эргономическое обеспечение проектирования человеко-машинных комплексов: проблемы, методология, технологии. Тверь: Изд. ТвГУ, 2004.

18. Hilburn B. J., Byrne E., Parasuraman R. The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload. In M. Mouloua & J. M. Koonce (Eds.) // Human-automation interaction: Research and practice Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1997. P. 84—91.

19. Kaber D. B., Riley J. M., Kheng-Wooi T., Endsley M. R. On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems // International Journal of Cognitive Ergonomics. 2001. 5 (1). P. 37—57.

20. Lombard M., Ditto T. At the Heart of it All: The Concept of Presence // Journal of Computer Mediated Communication. 1997. 3 (2).

21. Rouse W. B. Adaptive aiding for human/computer control // Human Factors. 1988. 30. P. 431—443.

22. Scerbo M. W. Theoretical perspectives on adaptive automation // Automation and human performance: Theory and applications Mahwah / R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.). NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1996. P. 37—63.

23. Witmer B. G., Singer M. J. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire, Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1998. 7 (3). P. 225—240.

УДК 621.865.8

**А. А. Обознов**, д-р психол. наук, проф., зав. лаб.,  
aao46@mail.ru,

Институт психологии РАН, Москва,

**Э. В. Волков**, руководитель,

**Е. Д. Чернецкая**, зав. лаб.,

Научно-методический центр "Прогноз"

Центрального института повышения квалификации

ОАО "Атомэнергопром", г. Обнинск

## Образно-концептуальные модели в деятельности операторов сложных эргатических систем<sup>1</sup>

*Показана роль образно-концептуальной модели в обеспечении эффективной деятельности операторов сложных эргатических систем. Представлены результаты эмпирического исследования содержания и структур образно-концептуальных моделей у операторов атомных станций. Раскрываются особенности структур образно-концептуальных моделей в зависимости от профессиональной успешности операторов.*

**Ключевые слова:** образно-концептуальная модель, сложная эргатическая система, операторы атомных станций, психосемантический метод

### Введение

Наука управления в нашей стране многие годы развивалась в направлении разработки технических систем управления, не включавших участия чело-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ; проект № 11-06-01136а.

века. Первая волна интереса к проблеме человеческого фактора возникла в науке управления на рубеже 60...70-х годов XX века в связи с созданием систем "человек—машина". Тогда появилась необходимость исследований роли человека в системах управления и построении теоретических моделей, отражающих влияние его особенностей на процессы управления. Новая волна интереса к данной проблеме связана с осознанием неадекватности традиционных представлений о возможностях человека в решении задач управления и стремлением соотнести между собой взгляды, рассматривающие роль человека с разных, в том числе кардинально отличающихся, позиций [1].

Выделим две позиции, существенно различающиеся в понимании роли человека-оператора в эргатических системах<sup>2</sup>. Согласно одной позиции управление в системе осуществляется техническими устройствами, а человеку-оператору отводится роль резервного звена. Его основная задача состоит в контроле технических устройств, а непосредственное включение в процесс управления происходит при поступлении экстренных сигналов о сбоях тех-

<sup>2</sup> В широком смысле слова, эргатическая система (от греч. ergates — действующее лицо, деятель) — это любая система, функционирующая с участием человека, например, производственная бригада, воинское подразделение, студенческая группа и т. п. [2]. Считается, что применительно к техническим объектам термин "эргатическая система" был официально зафиксирован в 1960 году на I Международном конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению для обозначения систем, включающих человека-оператора, целесообразно функционирующего в совокупности с комплексом технических средств [3]. В данной статье термин "эргатическая система" используется в этом значении.

ники. В этих случаях от человека-оператора требуется выполнить хорошо заученную последовательность действий в ответ на поступивший сигнал. При данном понимании на первый план выходят инженерно-психологические исследования возможностей человека-оператора по длительному поддержанию бдительности и сохранению эмоциональной устойчивости при отработке экстренных сигналов.

Согласно другой позиции, на которую всегда ориентировалась отечественная инженерная психология, человеку-оператору отводится в эргатической системе роль ответственного субъекта [4, 5]. Это означает, что в пределах возлагаемых на человека-оператора полномочий за ним признается право и возможность принимать самостоятельные решения по оценке обстановки и выбору управляющих воздействий с одновременным принятием на себя ответственности за их последствия. Такая роль предполагает выполнение человеком-оператором профессиональных задач на основе понимания и предвидения происходящих событий в системе, а не только на основе заученных действий. Иначе говоря, у человека-оператора должна быть создана *образно-концептуальная модель* эргатической системы — совокупность знаний и сведений о функционировании системы, возможных проблемных ситуациях, параметрах рабочей среды, правилах принятия решений, программах собственных управляющих действий и их последствиях [6]. При данном понимании на первый план выходят исследования возможностей человека-оператора создавать и эффективно использовать в своей деятельности образно-концептуальные модели эргатических систем.

Проблема, которая рассматривается в данной статье, состоит в раскрытии взаимосвязей между характеристиками образно-концептуальных моделей и успешностью работы операторов сложных эргатических систем.

### **Образно-концептуальные модели: от описания функций и содержания к выявлению структуры**

Познание образно-концептуальных моделей (ОКМ), как и умственных образований вообще, развивается от научного описания их функций и содержания к выявлению структур, т. е. способов организации содержащихся в этих моделях знаний и сведений. Движение от рассмотрения функций (предназначения) к содержанию, а затем к структуре ОКМ имеет свою логику. Действительно, функции определяют содержание в том смысле, что содержание обеспечивает их реализацию, а не наоборот. В свою очередь, содержание (знаний и сведений) определяет структуру в том смысле, что структура отражает закрепившийся способ организации имеющихся в ОКМ знаний и сведений, а не наоборот.

Основные *функции* образно-концептуальной модели<sup>3</sup> были указаны английским инженерным психологом А. Г. Велфордом полвека тому назад, а именно предоставлять человеку-оператору возможность: (1) создать у себя иногда не очень точную, но главное, *целостную* "умственную картину" функционирования эргатической системы; (2) *прогнозировать* изменения ее состояний; (3) действовать *эффективно* (по [4]).

Какое *содержание* ОКМ обеспечивает реализацию данных функций?

Возможность построения человеком-оператором *целостной* "умственной картины" эргатической системы подразумевает мысленные соотнесения им между собой разных сторон ее функционирования. По результатам исследований А. И. Галактионова, у операторов последовательно формируются несколько видов ОКМ (психических образов по терминологии автора) — технологические, топологические, функциональные, информационные, алгоритмические и образные модели. Каждый вид ОКМ содержит сведения о различных элементах (сторонах) эргатической системы и типах связей между элементами. В технологических ОКМ представлены сведения об отдельных элементах технологического процесса и технического оборудования (агрегат, устройство, участок, технологическая операция, направления материальных и энергетических потоков, контролируемые параметры и т. д.), а также о производственно-технологических связях между этими элементами. В топологических ОКМ отражены сведения о тех же элементах и топологических связях между ними; в функциональных ОКМ — сведения о состояниях и изменениях этих элементов (отключение, включение или переключение агрегата, изменение значения и/или знака контролируемых параметров и т. п.) и причинно-следственных связях между ними; в информационных ОКМ — сведения о значениях параметров технологического процесса, отражаемых на средствах индикации, и причинно-следственных связях между изменениями этих параметров; в алгоритмических ОКМ — сведения о значениях параметров, отражаемых на средствах индикации, и алгоритмических связях между ними; наконец, в образных ОКМ — сведения о проблемных ситуациях, а также алгоритмических и пространственных связях между ними [7].

Итак, у человека-оператора сосуществуют несколько видов образно-концептуальных моделей одной и той же эргатической системы, в которых представлены сведения о разных сторонах ее функционирования. Тем самым, у него появляется возможность мысленного соотнесения этих сведений

<sup>3</sup> А. Г. Велфорд использовал термин "концептуальная модель" (англ. *conceptual model*).

и создания целостной "умственной картины" функционирования эргатической системы.

Возможность *прогнозирования* человеком-оператором изменений в состояниях эргатической системы подразумевает, что в образно-концептуальной модели отражены закономерные изменения функционирования системы (понятно, что прогнозировать можно лишь те изменения и события, которые подчинены определенным закономерностям).

Согласно результатам исследований Д. А. Ошанина, центральным в образно-концептуальной модели является представление о заданных изменениях функционирования эргатической системы ("образ—позитив") — состояние Б после состояния А, состояние В после состояния Б и так далее. Мысленно "развертывая" данное представление во времени, человек-оператор создает ожидания (прогнозирует), какими должны быть еще не наступившие изменения. Представлению о заданных изменениях всегда противопоставлено представление об отклонениях от них ("образ—негатив"). Его мысленная "развертка" позволяет человеку-оператору прогнозировать нежелательные варианты изменений состояний системы [8].

Таким образом, содержащиеся в образно-концептуальной модели представления о заданных изменениях и отклонениях от них позволяют человеку-оператору предвидеть изменения функционирования эргатической системы.

Возможность действовать *эффективно* подразумевает, что образно-концептуальная модель содержит обобщенные схемы, используемые операторами для принятия решения и осуществления управляющих действий [6]. Эффективность этих схем определяется, прежде всего, тем, что они формируются на основе прогнозирования изменений технологического процесса; тем самым, операторы получают резерв времени для принятия решения и выполнения упреждающих действий, что особенно важно для обеспечения функционирования сложных эргатических систем.

Конечно, приведенные выше данные не отражают всего объема исследований, касающихся содержания ОКМ. Мы ограничились обращением лишь к тем результатам, с помощью которых наиболее отчетливо показывается взаимообусловленность функций образно-концептуальной модели и хранящихся в ней сведений и знаний.

Каковы *способы организации* этих сведений и знаний или, другими словами, структуры ОКМ? Выявление этих структур имеет решающее значение для понимания возможностей человека-оператора создавать и эффективно использовать образно-концептуальные модели в своей деятельности.

В соответствии со сложившимися в современной когнитивной психологии взглядами, именно в раскрытии способов организации знаний, сведений и представлений (ментальных структур), имею-

щихся у человека, находится ключ к раскрытию его познавательных возможностей [9]. Главная причина того, почему психологи интересуются ментальными структурами, состоит в следующем: способ организации имеющихся у человека знаний и сведений влияет на то, как они им приобретаются, хранятся, передаются и используются [10]. Следует подчеркнуть, что ментальные структуры не являются застывшими образованиями. Слово "структура" происходит от латинского глагола *struere*, что означает "быть построенным". Уже само использование данного термина указывает на то, что ментальные структуры формируются, "строятся" и могут видоизменяться в опыте человека [11].

Изложенные взгляды в полной мере относятся и к структурам образно-концептуальной модели. Будучи сформированными, они начинают определять процессы использования операторами уже хранящихся и упорядочивания вновь поступающих в ОКМ сведений. Тем самым, структуры ОКМ оказывают влияние и на процессы реализации ее функций — создание и поддержание целостной "умственной картины" функционирования эргатической системы, прогнозирование изменений ее состояний, обеспечение эффективных действий человека-оператора.

Поскольку структуры ОКМ, как и ментальные структуры вообще, могут видоизменяться, правомерно полагать, что они различаются по мере приобретения профессионального опыта и повышения квалификации операторов. Результаты немногочисленных эмпирических исследований показали, что у опытных специалистов эти структуры мало различаются между собой и, вместе с тем, сильно разнятся от способов организации профессиональных знаний у новичков. Например, ментальные структуры (способы организации 30 понятий, связанных с пилотированием) опытных летчиков-истребителей оказались сходными между собой, но отличались от ментальных структур менее опытных летчиков. Авторы этого исследования обнаружили, что по ментальной структуре, характерной для летчика-истребителя, можно установить, новичок он или опытный пилот [12].

В связи с этим, интересующая нас **проблема конкретизируется** следующим образом: выявить взаимосвязи между *структурными* характеристиками образно-концептуальных моделей и успешностью работы операторов атомных станций.

#### **Атомная станция как сложная эргатическая система**

Необходимость использования человеком-оператором образно-концептуальной модели становится наиболее очевидной, когда речь идет о его включении в сложную эргатическую систему. Такой системе присущи: большое число входящих в нее

разнородных подсистем; наличие между ними многочисленных взаимосвязей, включая нелинейные и нестабильные взаимовлияния; нестационарные экстремальные условия рабочей среды; воздействия субъективных факторов, связанных с персоналом, например, несанкционированные действия и поступки сотрудников; другие неизвестные ранее особенности функционирования системы. Вследствие взаимодействия указанных переменных в процессе функционирования сложной эргатической системы могут проявляться непредсказуемые свойства. Эти свойства обозначаются как *потенциальные*, поскольку они остаются неизвестными на этапах проектирования системы и проявляют себя позднее, при ее эксплуатации. Поэтому при управлении сложными эргатическими системами — атомными станциями, орбитальными комплексами, пилотируемыми космическими кораблями, летательными аппаратами новых поколений, крупнотоннажными морскими судами и др. — человек-оператор сталкивается, помимо расчетных (штатных и нештатных), также и с нерасчетными ситуациями, обусловленными проявлениями потенциальных свойств системы [13].

Атомные станции относятся к числу наиболее сложных эргатических систем, о чем свидетельствуют следующие показатели:

- *число элементов* — более 50 технологических систем; более 60 тысяч единиц оборудования 18 типов и 400 наименований, в том числе, около 4000 единиц арматуры и регуляторов, около 16 000 средств технологического контроля — датчиков, преобразователей и др.;
- *число параметров* — около 2500 аналоговых и 3200 дискретных сигналов, от 600 до 4000 элементов сигнализации;
- *число элементов управления* — от 500 до 2000 органов управления, включая ключи, кнопки, переключатели и др.;
- *число взаимосвязей* практически не поддается полному описанию; они имеют разную природу (физическую, химическую, информационную, организационную и т. д.) и разный характер (прямые, косвенные, нестандартные и проявляющиеся только при авариях);
- *нелинейные* характеристики большинства технологических процессов;
- число задач — около 20 штатных, более 60 нештатных;
- *различный характер задач* — штатные стереотипные задачи, занимающие подавляющую часть рабочего времени операторов; динамичные пуско-остановочные задачи, осуществляемые по четкому алгоритму в течение незначительной доли времени и сопровождающиеся возрастанием информационного потока в 4...10 раз; задачи в нештатных и нерасчетных ситуациях, требующие выполнения сложных исполнительских

действий, принятия нетривиальных решений и сопровождающиеся возрастанием информационного потока в 20...40 раз, а при авариях — более чем в 100 раз;

- *сложность задач* — от самых простых и рутинных до задач, имеющих сложный разветвленный алгоритм решения в условиях значительной неопределенности;
- *существенные ограничения по времени* жестко регламентируют скорость действий операторов; опыт эксплуатации станций показывает, что время от возникновения нарушения в работе оборудования до появления необратимых изменений в технологическом процессе составляет от 20 до 100 с.

Перечисленные показатели провоцируют появление ситуаций, в которых образуется цепочка распространения возмущений. Локальные неисправности приводят к многочисленным изменениям на других участках технологического процесса. Возможно появление так называемого "наложения отказов", когда одновременно возникают несколько зависимых или независимых возмущений. Такие отказы маскируют друг друга, поэтому неисправности в первый момент выглядят совершенно не теми, какими являются на самом деле. Положение еще более осложняется вследствие значительного промежутка времени между симптомами и их причинами. В таких ситуациях операторы испытывают значительные трудности в восстановлении хронологической последовательности событий: какое из них было первичным, а какие — вторичными [14].

**Оперативный персонал** атомной станции предназначен для несения круглосуточного дежурства на всех ключевых постах управления ее технологическими процессами и оборудованием. Оперативное руководство осуществляет начальник смены станции — главное оперативное лицо (главный оператор), которому подчинен весь персонал работающей смены. В непосредственном подчинении у начальника смены станции находятся начальники смен энергоблоков, задача которых — оперативное руководство эксплуатацией "своего" энергоблока. Начальник смены энергоблока является одним из основных операторов на станции. Вместе с ним на каждом энергоблоке несут дежурство два других основных оператора — ведущий инженер по управлению реактором (ВИУР) и ведущий инженер по управлению турбиной (ВИУТ). Основная часть дежурства основных операторов проходит на блочном щите управления, куда стекается вся основная оперативная информация и откуда дистанционно выполняется большинство переключений. Задачи ВИУР — оперативное управление с блочного щита ядерным реактором, его пуск, остановка, подъем и снижение мощности в соответствии с заданным графиком и режимными картами. Задачи ВИУТ — оперативное управление с блочного щита турбоаг-

регатом и его технологическими системами, выполнение операций по пуску и остановке оборудования, регуляция работы генератора.

Основные операторы (начальники смен, ВИУР, ВИУТ) имеют право отказаться от выполнения программ и распоряжений, угрожающих жизни людей, целостности оборудования и безопасной эксплуатации ядерного реактора. Например, в случае угрозы для безопасности станции ведущий инженер управления реактором вправе самостоятельно остановить реактор или перевести его в глубоко подкритическое состояние. Основные операторы несут ответственность как за невыполнение, необоснованную задержку или неправильное выполнение распоряжений руководства, так и за выполнение ошибочных руководящих распоряжений, повлекших за собой вывод из строя закрепленного за ним оборудования или приведших к несчастным случаям [14].

Принятие обоснованных, самостоятельных и ответственных решений, предвидение и преодоление нерасчетных ситуаций являются наиболее сложными задачами для основных операторов атомных станций. Успешное решение этих задач предполагает наличие у операторов образно-концептуальной модели — целостной "умственной картины", которая дает им возможность соотнести разные стороны функционирования атомной станции, прогнозировать развитие событий, действовать разумно и эффективно.

#### **Эмпирическое исследование структурных характеристик образно-концептуальных моделей у операторов атомных станций**

**Цель исследования** — выявить особенности структур образно-концептуальных моделей у основных операторов с различной профессиональной успешностью.

**Этапы и методики исследования.** На *первом этапе* изучали способы организации в образно-концептуальных моделях сведений о разных сторонах функционирования энергоблока атомной станции. Использовали *методику группировки (классификации)* понятий (терминов) в более общие группы, обычно не более пяти-шести. Критерии объединения не задаются, а выбираются самим человеком. После завершения группировки человек дает обозначения созданным группам.

Для группировки были отобраны 60 терминов, связанных с профессиональной деятельностью основных операторов атомных станций. Отбор проводился двумя экспертами — основными операторами с большим стажем работы. Отобранные термины обозначали четыре класса переменных (по 15 терминов для каждого класса), отражающих разные стороны функционирования энергоблока атомной станции: должности оперативного персонала; функции оперативного персонала; технические системы

и оборудование; параметры этих систем и оборудования. Эти переменные должны обязательно отражаться в содержании ОКМ у всех основных операторов независимо от их должностной позиции.

Обследуемым операторам давалась следующая инструкция: "Перед Вами находятся карточки с названиями различных должностей и функций оперативного персонала станции, ее технических систем, оборудования, а также их параметров. Объедините термины в группы (не более трех-пяти групп). Признак (критерий) объединения может быть любым". Группировка терминов проводилась каждым обследуемым оператором специалистом дважды. После завершения группировки операторы давали название каждой группе терминов и поясняли, по какому критерию проводилась группировка.

В исследованиях первого этапа приняли участие 20 основных операторов трех атомных станций, включая ведущих инженеров управления реактором и турбиной, а также начальников смен реакторного цеха. Стаж работы обследованных специалистов в должностях основных операторов составлял от 6 месяцев до 4 лет.

На *втором этапе* изучали особенности структур образно-концептуальных моделей сведений у операторов с различной профессиональной успешностью. Для выявления указанных структур использовали методику *субъективного шкалирования*, которая относится к прямым методам получения матрицы семантического сходства. Перед человеком ставится задача оценить субъективное сходство понятий с помощью некоторой градуальной шкалы. Получаемые количественные оценки сходства заносятся в матрицу, которая подвергается процедуре многомерного анализа. Суть последнего состоит в следующем: исходя из данных матрицы субъективного сходства реконструируется такое геометрическое пространство минимально возможной размерности, в котором расстояния между координатными точками, соответствующими сравниваемым понятиям, подобны величинам исходных оценок сходства [15]. В итоге выделяется *n*-мерное (как правило, двухмерное) семантическое пространство, удовлетворительно описывающее исходные матрицы.

Для субъективного шкалирования двумя экспертами — операторами с большим стажем работы — были отобраны 32 термина из 60 использовавшихся на первом этапе. Как и ранее, отобранные термины обозначали четыре класса переменных (по восемь терминов для каждого класса): должности оперативного персонала; функции оперативного персонала; технические системы и оборудование; параметры этих систем и оборудования.

Термины предъявлялись операторам для попарного сравнения в симметричной матрице размерностью  $32 \times 32$ . Инструкция: "Просим Вас оценить, насколько связаны между собой термины, касающиеся функционирования атомной станции. Оце-

ните степень связанности каждой пары терминов по семибальной шкале:

1 — очень низкая степень связанности терминов между собой;

2 — низкая степень связанности терминов между собой;

3 — связанность терминов между собой ниже среднего;

4 — средняя степень связанности терминов между собой;

5 — связанность терминов между собой выше среднего;

6 — высокая степень связанности терминов между собой;

7 — очень высокая степень связанности терминов между собой.

Правильных или неправильных ответов не бывает, важны Ваши личные оценки степени связанности терминов между собой".

Каждый оператор оценивал степень связанности каждого термина с каждым другим термином, всего выполняя 496 сравнений. Далее заполненные матрицы подвергались процедуре многомерного шкалирования с последующим построением двухмерных семантических пространств.

Определение профессиональной успешности операторов проводилось с помощью методики "Уровень должностного соответствия" [16]. Выделяли три уровня должностного соответствия по девятибальной шкале: высокий (от 7 до 9 баллов), средний (от 4 до 6 баллов) и низкий (от 1 до 3 баллов). Выделенным уровням соответствовали три градации профессиональной успешности: высокая, средняя и низкая. Исходными данными служили экспертные оценки, получаемые на каждого оператора от трех экспертов. В их роли выступали непосредственные руководители, хорошо знающие обследуемых операторов, инструкторы учебно-тренировочных центров, а также психологи, участвующие в противоаварийных тренировках на полномасштабном тренажере. Для определения согласованности экспертных оценок, полученных от разных экспертов, высчитывался коэффициент конкордации.

В исследованиях второго этапа приняли участие 22 основных оператора — ведущих инженеров по управлению реактором, представлявших две атомных станции. Стаж работы обследованных операторов в должности ВИУР составлял от полугода до 18 лет.

**Результаты 1-го этапа. Критерии организации сведений, содержащихся в образно-концептуальных моделях.** Согласно полученным результатам, все 20 обследованных основных операторов, независимо от должности и стажа работы в ней, проводили группировку терминов по двум критериям (см. таблицу).

Один критерий — *качественное своеобразие* содержания терминов. По данному критерию термины группируются по главному свойству, которое

**Варианты группировки терминов**

№№ групп	Критерий группировки	
	Качественное своеобразие	Технологический
1	Должности оперативного персонала	Реакторный цех
2	Функции оперативного персонала	Турбинный цех
3	Технические подсистемы и оборудование	Вспомогательные цеха и службы
4	Параметры технических подсистем и оборудования	Должности оперативного руководства

отличает их содержание от содержания других терминов. Например, одну группу терминов составили должности оперативного персонала. Главное свойство, которое их объединяет и одновременно отличает от других групп терминов, — полномочия и ответственность в зависимости от позиции в иерархии "руководители — исполнители". Качественно иное свойство положено при объединении терминов в группу "технические подсистемы и оборудование". Вообще говоря, данный критерий группировки терминов фактически уже "заложен" в задаваемой операторам инструкции и в этом смысле навязан им.

Другой критерий, который может быть назван *технологическим*, выбирался всеми обследованными операторами самостоятельно. В основу объединения терминов была положена не общность свойств их содержания, а общая принадлежность к определенному технологическому объекту (контур, процессу). Например, группу "реакторный цех" составили следующие разнокачественные по содержанию термины:

- *должности оперативного персонала* — ведущий инженер управления реактором, начальник смены реакторного цеха, старший оператор реакторного цеха, инженер реакторного цеха;
- *функции оперативного персонала* — дистанционное управление оборудованием реакторного цеха, регулирование мощности по первому контуру, оперативный контроль и регулирование параметров первого контура;
- *технические системы и оборудование* — система паропроводов "острого пара", система "организованных протечек", главный циркуляционный насос, промежуточный контур, подпитка и борное регулирование, промежуточный контур системы защиты реактора, система внутриреакторного контроля, система автоматического регулирования параметров;
- *параметры технических систем* — давление в первом контуре, мощность нейтронная, средняя температура теплоносителя, расход питательной воды, температурный перепад на активной зоне, положение регулирующей группы (кассет АК).

Аналогичные группы терминов формируются применительно к турбинному цеху и другим технологическим объектам атомной станции.

Технологический критерий является доминирующим в организации сведений, хранящихся в образно-концептуальных моделях. Эти сведения упорядочиваются и объединяются в более крупные единицы, что создает необходимые предпосылки для формирования у операторов целостных и превосходящих представлений о функционировании атомной станции. Внешним выражением такой организации можно рассматривать зафиксированные в исследовании группы терминов "реакторный цех", "турбинный цех", "вспомогательные цеха и службы".

Итак, использованная на первом этапе исследования методика группировки позволила установить состав групп, в которые объединяются хранящиеся в ОКМ сведения, а также критерии их объединения. Однако с помощью данной методики нельзя установить, как связаны между собой разные группы и сведения внутри каждой группы, т. е. собственно структуру образно-концептуальных моделей.

**Результаты 2-го этапа. Технологический принцип формирования структуры образно-концептуальной модели.** В итоге применения процедуры многомерного шкалирования к матрице, усредненной по всей группе ведущих инженеров по управлению реактором (22 оператора), было получено двухмерное семантическое пространство, удовлетворительно описывающее представленные в этой матрице исходные данные (рис. 1).

Горизонтальную ось пространства (Dimension 1) мы интерпретировали как фактор "технологический процесс производства тепловой и электрической энергии", а вертикальную (Dimension 2) — как фактор "оперативное управление и исполнение".

Полюсы *горизонтальной* оси составляют термины, относящиеся к двум основным объектам технологического процесса производства тепловой и электрической энергии — реакторному (первый контур) и турбинному (второй контур) цехам. На одном (на рис. 1 — на левом) полюсе представлены термины, связанные с функционированием реакторного цеха (первый контур): давление в первом контуре (ДавПерКон), тепловая мощность (Тепл.Мощ.), оперативный контроль и регулирование параметров первого контура (ОперКонРег), оперативный запас реактивности (ОперЗапРеак), главный циркуляционный насос (ГЦН), дистанционное управление оборудованием реакторным цехом (ДисУпрРЦ), системы безопасности (СистБезоп), система внутриреакторного контроля (СистВнутрКонт), система автоматического регулирования параметров КД (СисАвРег), начальник смены реакторного цеха (НСРЦ), ведущий инженер по управлению реактором (ВИУР).

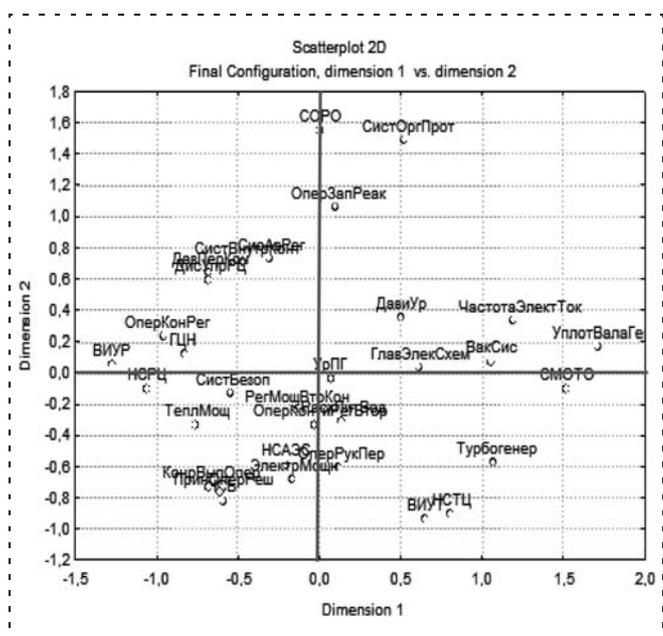


Рис. 1. Двухмерное семантическое пространство терминов, усредненное для всей группы ВИУР (22 оператора)

На другом (на рис. 1 — на правом) полюсе представлены термины, относящиеся к функционированию турбинного цеха (второй контур): уплотнение вала генератора (УплотВалаГен), регулирование мощности по второму контуру (РегМощВторКон), вакуумная система (ВакСис), старший машинист-обходчик по турбинному оборудованию (СМОТО), турбогенератор (Турбогенер), оперативный контроль и регулирование параметров второго контура (ОперКонтРегВтор), главная электрическая схема (ГлавЭлекСхем), частота электрического тока (ЧастотаЭлектТок), давление и уровни в деаэраторах (ДавиУр), начальник смены турбинного цеха (НСТЦ), ведущий инженер по управлению турбиной (ВИУТ).

Полюсы *вертикальной* оси составляют термины, относящиеся к оперативному руководству энергоблоком и оперативному исполнению руководящих указаний, включая термины о технических системах и их параметрах, посредством которых реализуется оперативное руководство и исполнение. На одном (на рис. 1 — на нижнем) полюсе представлены термины, относящиеся к оперативному руководству: начальник смены станции (НСС), начальник смены блока (НСБ), принятие оперативных решений (ПриОперРеш), электрическая мощность (ЭлектрМощн), контроль выполнения операций (КонтрВыпОпер), оперативное руководство персоналом (ОперРукПер).

На другом (на рис. 1 — на верхнем) полюсе представлены термины, связанные с исполнительской деятельностью: старший оператор реакторно-

го отделения (СОРО), система организованных протечек (СистОргПрот).

Итак, результаты многомерного шкалирования подтверждают данные первого этапа исследований о том, что содержащиеся в образно-концептуальных моделях сведения объединяются по технологическому критерию. Но главный итог этих результатов состоит в выявлении принципа организации сведений, т. е. структуры ОКМ. Ее (структуру) образуют две оси.

Вдоль одной оси структурируются сведения о течении основного технологического процесса: производство с помощью реактора теплоносителя (разогретой до определенной температуры воды), его превращение в энергию пара, а затем — электрическую энергию, причем речь идет о сведениях, отражающих не только функционирование технических систем и оборудования, но и обязанности должностных лиц, отвечающих за работу этих систем и оборудования. Иными словами, более точно называть основной процесс *социотехнологическим*.

Вдоль другой оси структурируются сведения об управлении социотехнологического процесса: оперативном руководстве, включая должностные позиции операторов-руководителей и контролируемые ими наиболее важные параметры процесса, а также оперативном исполнении, включая должностные позиции операторов-исполнителей и используемые ими технические системы и виды оборудования.

**Особенности структур образно-концептуальных моделей у операторов с различной профессиональной успешностью.** Рассмотренный выше технологический принцип организации содержащихся в ОКМ сведений является общим для основных операторов

ров независимо от их профессионального опыта и квалификации. Вместе с тем, можно высказать обоснованные предположения о специфике структуры образно-концептуальных моделей, формирующихся у ведущих инженеров по управлению турбиной в зависимости от их профессиональной успешности.

По результатам экспертной оценки уровня должностного соответствия были выделены две группы ВИУР. Группу с высокой профессиональной успешностью составили 15 ВИУР (68 % от общей выборки), группу со средней профессиональной успешностью — 7 ВИУР (32 % от общей выборки). Операторов с низкой профессиональной успешностью в обследованной выборке не было. Отметим, что значения коэффициентов конкордации составили 0,87 для ВИУР одной атомной станции и 0,79 — другой. Эти значения свидетельствовали о высокой согласованности оценок, полученных от трех независимых экспертов.

На рис. 2 и 3 представлены двухмерные семантические пространства терминов для ВИУР с высокой и средней профессиональной успешностью. Общим для операторов остается технологический принцип структурирования сведений, содержащихся в образно-концептуальных моделях. Однако при общности принципа структурирования сведений по осям семантического пространства имеются различия в числе групп терминов. Выделение таких групп осуществляли по результатам кластерного анализа. Как видно из рис. 2, 3, образно-концептуальные модели у операторов с высокой успешностью содержат в среднем восемь групп терминов, тогда у операторов со средней успешностью — 12 групп, т. е. в полтора раза больше.

Поскольку термины объединяются в группы в зависимости от степени их субъективно оцениваемой связанности между собой, то укрупнение групп означает увеличение для операторов числа взаимосвязанных технических систем, видов оборудования, их параметров, должностей и функций оперативного персонала. Иначе говоря, у операторов с высокой профессиональной успешностью за счет большего числа содержащихся в ОКМ взаимосвязанных элементов, а также тесноты таких взаимосвязей создается более целостное и одновременно более дифференцированное представление о функционировании энергоблока атомной станции.

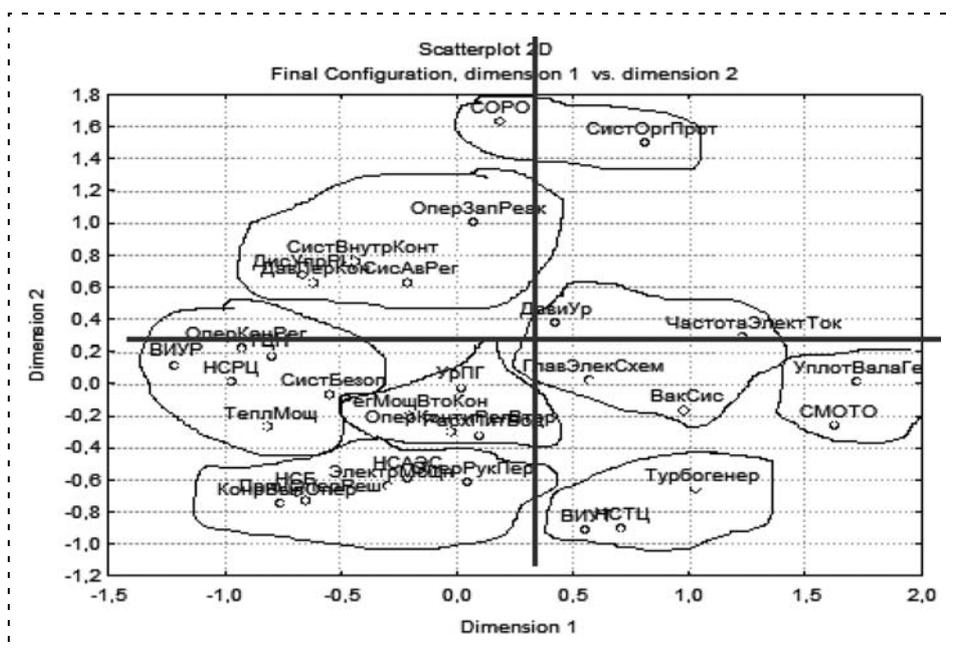


Рис. 2. Семантическое пространство терминов у ВИУР с высоким уровнем профессиональной успешности (усредненные данные для 15 операторов)

Анализ индивидуальных семантических пространств позволяет считать, что в образно-концептуальных моделях у высоко успешных ВИУР в наибольшей степени укрупняется группа "реакторный цех" (правый полюс горизонтальной оси на рис. 4).

При этом возрастание числа и тесноты взаимосвязей происходит не только за счет терминов, непосредственно касающихся функционирования реакторного цеха, но и других технологических объектов, включая турбинный цех, вспомогательные производственные подразделения и обеспечивающие службы. Это означает, что относящиеся к реакторному цеху должности оперативного персонала, служебные функции операторов, технические подсистемы и параметры все в большей степени соотносятся ВИУР с должностями, служебными функциями, техническими подсистемами атомной станции в целом.

Структура ОКМ, иллюстрируемая рис. 4, обеспечивает для ведущего инженера по управлению реактором целостное и одновременно дифференцированное представление о функционировании энергоблока в целом. Благодаря такой структуре ВИУР получают возможность быстро создавать и поддерживать целостное представление о функционировании атомной станции, предвидеть тенденции и принимать упреждающие решения. По-видимому, именно такая структура ОКМ и обеспечивает возможности человека-оператора для выполнения роли субъекта в сложной эргатической системе. Эта структура позволяет человеку-оператору длительно поддерживать представление-прогноз об изменяющихся многопараметрических процессах, характерных для современных технологий в энергетике, производстве и на транспорте.

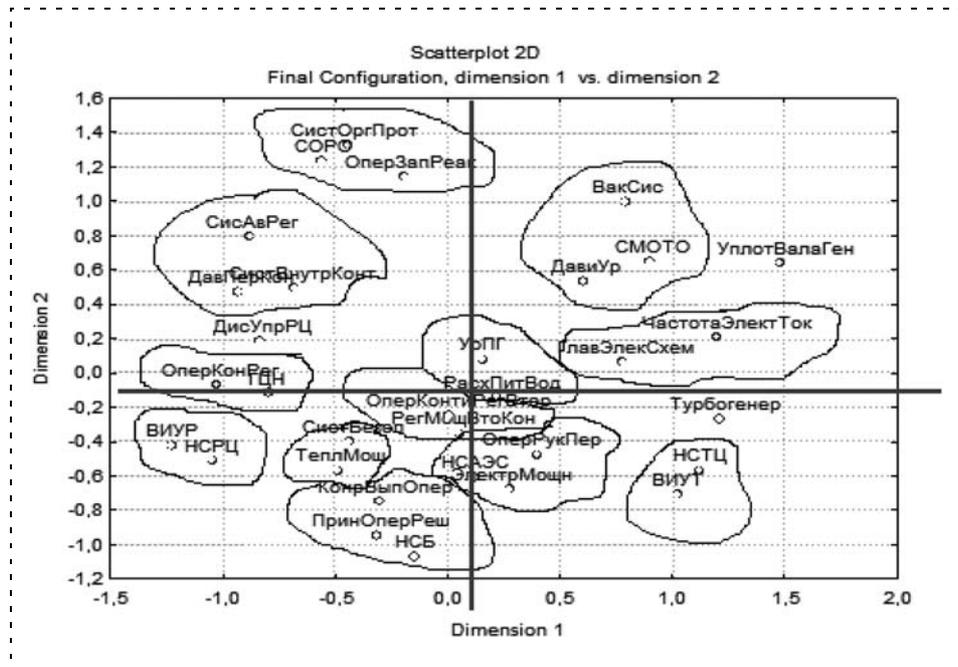


Рис. 3. Семантическое пространство терминов у ВИУР со средним уровнем профессиональной успешности (усредненные данные для семи операторов)

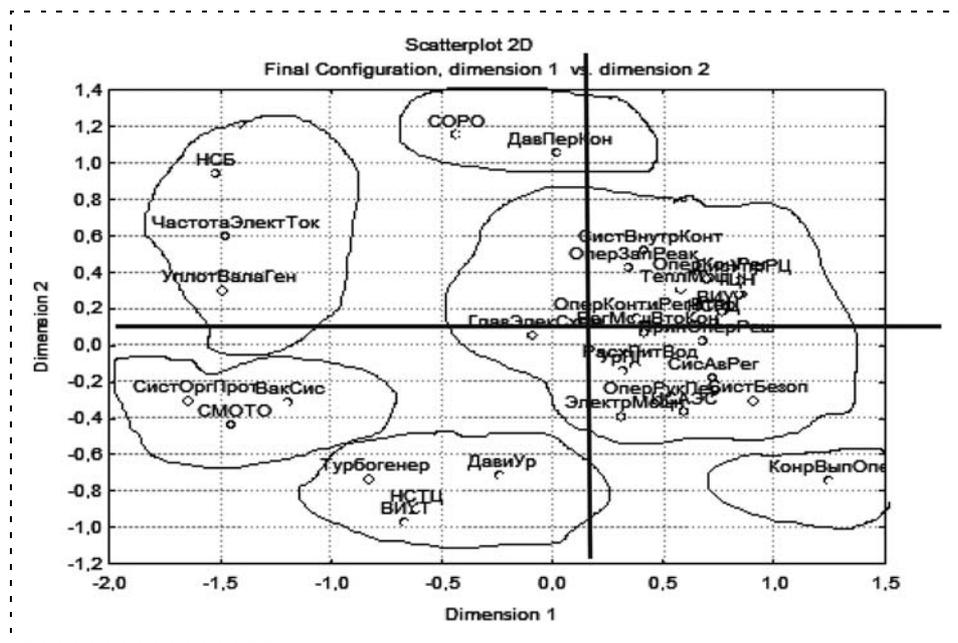


Рис. 4. Индивидуальное семантическое пространство у ВИУР с высоким уровнем профессиональной успешности

\*\*\*

Результаты проведенного эмпирического исследования образно-концептуальных моделей, формирующихся у операторов атомных станций, позволяют сделать следующие основные выводы.

Во-первых, содержание образно-концептуальных моделей у операторов атомных станций составляют

сведения не только о технических подсистемах, оборудовании и их параметрах, но и о функциональных обязанностях и взаимодействиях специалистов, работающих с этими системами. Это означает, что атомная станция выступает для операторов как *социотехническая* система.

Во-вторых, выявлен общий принцип, по которому структурируются сведения, содержащиеся в образно-концептуальной модели. Ее структуру образуют две оси. Вдоль одной оси структурируются группы сведений о течении основного технологического процесса, вдоль другой оси — группы сведений об управлении и обеспечивающих подразделениях.

В-третьих, установлены особенности объединения одних и тех же сведений, содержащихся в образно-концептуальных моделях, в более крупные группы в зависимости от профессиональной успешности основных операторов. По мере повышения профессиональной квалификации идет процесс объединения разнородных сведений во все более крупные группы за счет установления операторами взаимосвязей между этими сведениями. У операторов с высокой профессиональной успешностью число таких групп в полтора раза меньше, чем у операторов со средней профессиональной успешностью.

### Заключение

Возложение на человека-оператора в сложной эргатической системе роли ответственного субъекта приводит к необходимости рассмотрения его возможностей выполнять данную роль. Важнейшим фактором психологического порядка, определяющим эти возможности, является наличие у операторов образно-концептуальной модели эргатической системы. Только имея такую модель, он может решать профессиональные задачи как субъект, т. е. на основе понимания и предвидения происходящих событий, принятия самостоятельных решений и ответственности за последствия своих действий. В связи с этим возникает поставленная в статье проблема определения того, какими содержательными и структурными характеристиками должна обладать образно-концептуальная модель.

На данный момент мы еще не располагаем в полной мере научными результатами, необходимыми для решения поставленной проблемы. Вместе с тем, результаты проведенного исследования позволяют сделать шаг в переходе от этапа решения только исследовательских вопросов типа: "Какими бывают образно-концептуальные модели?" к этапу постановки вопросов проектировочного типа: "Какими *должны быть* образно-концептуальные модели?" и последующему этапу разработки способов и приемов целенаправленного формирования у операторов желаемых образно-концептуальных моделей.

### Список литературы

1. **Абрамова Н. А., Новиков Д. А.** Развитие представлений о человеческих факторах в науке управления / Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н. А. Абрамовой, К. С. Гинсберга, Д. А. Новикова. М.: КомКнига, 2006. С. 5—51.
2. **Душков Б. А., Смирнов Б. А., Королев А. В.** Психология труда, профессиональной, информационной и организационной деятельности: Словарь / Под ред. Б. А. Душкова. М.: Академический Проект: Фонд "Мир", 2005. С. 791.
3. **Зариковский Г. М., Павлов В. В.** Закономерности функционирования эргатических систем. М.: Радио и связь, 1987.
4. **Ломов Б. Ф.** Человек и техника. М.: Сов. радио, 1966.
5. **Зинченко В. П., Мунипов В. М.** Основы эргономики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.
6. **Мунипов В. М., Зинченко В. П.** Эргономика: человеко-ориентированное проектирование техники, программных средств и среды. М.: Логос, 2001.
7. **Галактионов А. И.** Системное исследование психических образов, формируемых оператором-технологом / Системный подход в инженерной психологии и психологии труда. М.: Наука, 1992. С. 92—105.
8. **Ошанин Д. А.** Предметное действие оперативный образ: Избранные психологические труды. М.: Изд. Московского психолого-социального института; Воронеж: Изд-во НПО "МОДЭК", 1999.
9. **Величковский Б. М.** Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. Т. 2. М.: Изд. центр "Академия", 2006.
10. **Андерсон Дж.** Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2002.
11. **Холодная М. А.** Психология интеллекта: парадоксы исследования. Томск: Изд-во Том. ун-та. М.: Барс, 1997.
12. **Червинская К. Р.** Компьютерная психодиагностика. СПб.: Речь, 2003.
13. **Голиков Ю. Я.** Методология психологических проблем проектирования техники. М.: Пер Сэ, 2003.
14. **Анохин А. Н., Острейковский В. А.** Вопросы эргономики в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2001.
15. **Петренко В. Ф.** Основы психосемантики. М.: Эксмо, 2009.
16. **Абрамова В. Н., Мельницкая Т. Б., Седин В. И.** Психологические особенности долгосрочного прогнозирования профессионального развития личности руководителей-операторов атомных станций // Тр. психологической службы в атомной энергетике и промышленности. Т. 1. Обнинск: Изд-во ОНИЦ "Прогноз", 2002.

**П. И. Падерно**, д-р техн. наук, проф.,  
pipaderno@list.ru,

**И. С. Павлухин**, аспирант,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина),

**А. В. Смирнов**, инженер-исследователь,  
LG Electronix

## Развитие функционально-структурной теории для оценки качества деятельности операторов эргатических систем

*Описана проблема оценки качества выполнения оператором алгоритмов дискретной деятельности. Представлен ряд подходов, направленных на получение и использование аналитических оценок безошибочного выполнения простейших алгоритмов, при различных условиях.*

**Ключевые слова:** алгоритмы деятельности, типовые функциональные структуры, различные типы ошибок, интервальные оценки, вероятностные оценки

### Введение

При проектировании сложных эргатических систем на ранних стадиях проектирования необходимо не только формировать алгоритмы выполнения оператором основных поставленных задач, но и проводить оценку качества их выполнения. В настоящее время под основными показателями качества выполнения дискретных алгоритмов понимаются: вероятность безошибочного выполнения, среднее время выполнения (быстродействие) и среднее квадратическое отклонение времени выполнения (ритмичность). Для проведения таких оценок нужно иметь не только алгоритм деятельности, но и необходимые для оценки исходные данные.

### Обобщенный структурный метод (функционально-структурная теория) описания и оценки алгоритмов деятельности

Для оценки безошибочности выполнения дискретной деятельности чаще всего используется обобщенный структурный метод (ОСМ) или его развитие — функционально-структурная теория [1]. Метод основан на формальном описании различных действий, выполняемых оператором: рабочих операций, контроля безошибочности выполнения операций, контроля работоспособности техники, логических операций и др., в виде типовых функциональных единиц (ТФЕ) с соответствующими вероятностными и временными характеристиками. Номенклатура ТФЕ (исходного алфавита) доста-

точно велика и является открытой. Однако она достаточно полна для современных нужд, о чем свидетельствует тот факт, что за последние 25 лет имеющаяся номенклатура практически не увеличилась. На основании анализа практических задач был выявлен ряд часто встречающихся фрагментов алгоритмов деятельности (типовых функциональных структур (ТФС)), для которых были получены аналитические выражения для оценки вышеперечисленных показателей качества выполнения. Практической реализацией ОСМ является пошаговая редукция исходного алгоритма деятельности путем преобразования имеющихся в нем ТФС в эквивалентные ТФЕ и пересчета соответствующих характеристик и, тем самым, получение результирующих показателей для оценки качества выполнения всего алгоритма в целом. На протяжении ряда лет этот метод являлся прогрессивным, потому что проводимые исследования в инженерной психологии обеспечивали необходимые исходные данные, а информационно-программные компоненты менялись достаточно медленно.

В настоящее время применение ОСМ в традиционной форме ограничено, поскольку предположение (по умолчанию) о том, что в выполняемом алгоритме имеют место только ошибки одного типа, часто не соответствует действительности. Кроме того, наличие точечных оценок исходных вероятностей весьма проблематично при отсутствии надлежащих исходных данных.

Таким образом, возникает проблема описания и оценки качества алгоритмов деятельности при возможных различных ошибках и неточных (интервальных или нечетких) исходных данных. Для успешного решения этой проблемы целесообразно, сохраняя ТФЕ, предложенные в ОСМ, проанализировать изменение сущности ТФС и получить некоторые аналитические зависимости для оценки качества их выполнения. Предлагаемый подход к решению этой проблемы значительно расширяет возможности, заложенные изначально в функционально-структурной теории [2]. При этом следует заметить, что некоторые попытки в получении результирующих характеристик при нечетких оценках исходных вероятностей уже предпринимались [4].

#### ♦ Рабочая операция (ТФЕ)

Пусть имеется некоторая рабочая операция, при выполнении которой возможно совершение  $k$  различных типов ошибок (рис. 1).

В результате выполнения этой операции возможны следующие события:

$A_0$  — событие, которое заключается в отсутствии ошибок;

$A_1$  — событие, которое заключается в совершении ошибки первого типа;

$A_i$  — событие, которое заключается в совершении ошибки  $i$ -го типа ( $i = 2, \dots, k$ ).

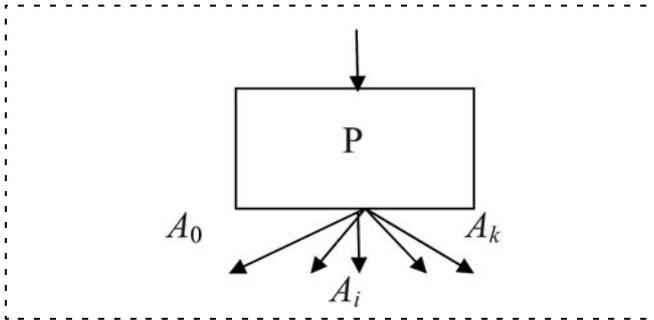


Рис. 1. Рабочая операция с  $k$  типами ошибок

Вектор соответствующих вероятностей имеет следующие компоненты  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ , причем выполняется соотношение  $\sum_{i=0}^k \beta_i = 1$ . Среднее время выполнения операции  $T_p$ , дисперсия времени выполнения операции  $D_p$ .

♦ *Последовательность рабочих операций (ТФС)*

Рассмотрим случай, когда  $n$  различных рабочих операций выполняются последовательно (рис. 2). Предположим, что все рассматриваемые рабочие операции выполняются независимо и описываются следующими характеристиками:  $\beta_{j0}, \beta_{j1}, \dots, \beta_{jk}, T_j, D_j, j = 1, 2, \dots, n$ . Первый индекс обозначает номер рабочей операции, а второй индекс указывает на число возможных различных ошибок при выполнении в данной рабочей операции. В соответствии с основными положениями ОСМ [1] такая последовательность выполняемых операций может быть агрегирована к единой укрупненной рабочей операции  $S$  (рис. 2).

Рассмотрим способы вычисления соответствующих вероятностей для укрупненной рабочей операции  $P_{Sk}$ . Введем в рассмотрение многочлен

$$\Phi_S(x_0, x_1, \dots, x_k) = \prod_{j=1}^n \left( \sum_{i=0}^k \beta_{ji} x_i \right), \quad (1)$$

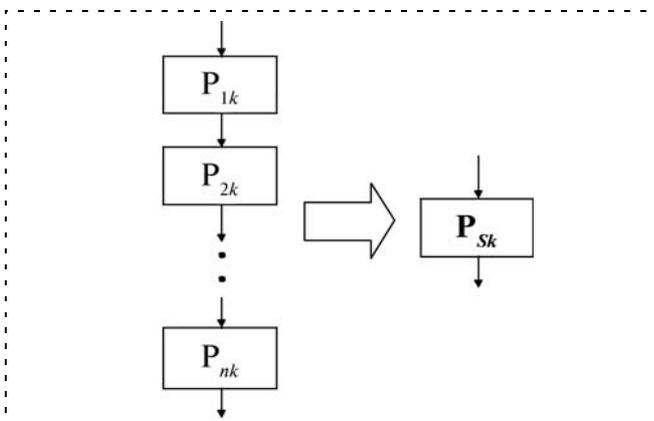


Рис. 2. Последовательность рабочих операций, в которых могут совершаться различные ошибки, и агрегированная рабочая операция

который является производящей функцией, т. е. коэффициент перед слагаемым  $x_0^{i_0} x_1^{i_1} \dots x_k^{i_k}, \sum_{j=0}^k i_j = n$ ,

является вероятностью того, что в результате выполнения всего комплекса из  $n$  рабочих операций из них  $i_0$  операций было выполнено без ошибок, ошибка типа  $A_1$  была допущена  $i_1$  раз, ошибка типа  $A_2$  была допущена  $i_2$  раз, и так далее, т. е. ошибка типа  $A_m$  была допущена  $i_m$  раз.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся частные случаи.

*Случай 1*

Пусть все ошибки ранжированы по важности  $A_1 < A_2 < \dots < A_k$ . При дальнейших рассуждениях будем полагать, что наличие ошибки с большим номером как бы поглощает все совершенные ошибки с меньшими номерами, что обусловлено тем, что контроль, диагностика и последующее исправление ошибки с номером  $A_m$  автоматически распознают и устраняют все ошибки с меньшими номерами  $A_1, A_2, \dots, A_{m-1}$ , вне зависимости от их числа. Сформируем производящую функцию в виде

$$\Phi_S(x_0, x_1, \dots, x_k) = \sum_{j=0}^k \Phi_j(x_0, x_1, \dots, x_j),$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_j(x_0, x_1, \dots, x_j) &= \\ &= \sum_{i_j=1}^n B(i_0, i_1, \dots, i_j) x_0^{i_0} x_1^{i_1} \dots x_j^{i_j}, \end{aligned} \quad (2)$$

$B(i_0, i_1, \dots, i_j)$  — вероятность того, что  $i_0$  раз не было ни одной ошибки, ошибка 1-го типа произошла  $i_1$  раз, ошибка  $j$ -го типа произошла  $i_j$  раз, а ошибки с большим, чем  $j$ , номером не произошли, причем  $\sum_{l=0}^j i_l = n$ . Суммирование проводится по всем возможным комбинациям, в которых наибольшим номером переменной является номер  $j$ . Полагая  $x_0 = x_1 = \dots = x_k = 1$ , получаем, что значения отдельных компонент  $\Phi_j(1, 1, \dots, 1) = \sum_{i_j=1}^n B(i_0, i_1, \dots, i_j)$  суть

вероятности того, что ошибка типа  $A_j$  имела наибольший номер в данном конкретном алгоритме. Эти вероятности могут быть подсчитаны по следующим формулам:

$$\Phi_0 = \prod_{j=1}^n \beta_{j0}, \quad \Phi_1 = \prod_{j=1}^n (\beta_{j0} + \beta_{j1}) - \prod_{j=1}^n \beta_{j0}; \quad (3)$$

$$\Phi_i = \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^i \beta_{jm} \right) - \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^{i-1} \beta_{jm} \right) =$$

$$= \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^i \beta_{jm} \right) - \sum_{m=0}^{i-1} \Phi_m;$$

$$\Phi_k = \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^k \beta_{jm} \right) - \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^{k-1} \beta_{jm} \right) =$$

$$= 1 - \prod_{j=1}^n \left( \sum_{m=0}^k \beta_{jm} \right) = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} \Phi_m.$$

Полученные вероятности могут быть интерпретированы как вероятности соответствующих ошибок для укрупненной структуры  $S$ , т. е.

$$\beta_{S0} = \Phi_0, \beta_{S1} = \Phi_1, \beta_{S2} = \Phi_2, \dots, \beta_{Sk} = \Phi_k.$$

### Случай 2

На практике, ввиду достаточно малых значений вероятностей событий  $A_1, A_2, \dots, A_k$  чаще всего считают, что в последовательности рабочих операций (рис. 2) не происходит более одной ошибки. В этом случае необходимо скорректировать получаемые вероятности следующим образом:

$$\beta_{S0} = \frac{\prod_{j=1}^n \beta_{j0}}{\prod_{j=1}^n \beta_{j0} + \prod_{j=1}^n \beta_{j0} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k \frac{\beta_{ji}}{\beta_{j0}}};$$

$$\beta_{S0} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k \frac{\beta_{ji}}{\beta_{j0}}};$$

$$\beta_{Sl} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\beta_{jl}}{\beta_{j0}}}{1 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k \frac{\beta_{ji}}{\beta_{j0}}},$$

где  $l = 1, 2, \dots, k$ .

Естественно, что приведенные формулы, в силу имеющихся допущений, только приближенно отражают реальные значения показателей, но погрешности, возникающие при данных предположениях, невелики. На рис. 3 и 4 приведены ошибки при оценке вероятностей для первого и второго случаев для различных исходных вероятностей.

**I вариант.** Исходные данные: число операций  $n = 20$ , число возможных ошибок в каждой из операций  $k = 10$ .  $\beta_{j0} = 0,999$  ( $\beta_{j1} = \beta_{j2} = \dots = \beta_{j10} = 0,0001$ ). Исходные и результирующие данные представлены в табл. 1.

Следует заметить, что вероятность выполнения всего комплекса операций в первом случае является

слегка завышенной. Этот факт объясняется исключением из рассмотрения вероятностей кратных ошибок и неучетом возможности нескольких параллельных ошибок различного типа.

Графики зависимостей изменения результирующих вероятностей приведены на рис. 3.

**II вариант.** Исходные и результирующие данные сведены в табл. 2.

Графики зависимостей изменения результирующих вероятностей приведены на рис. 4. Для полу-

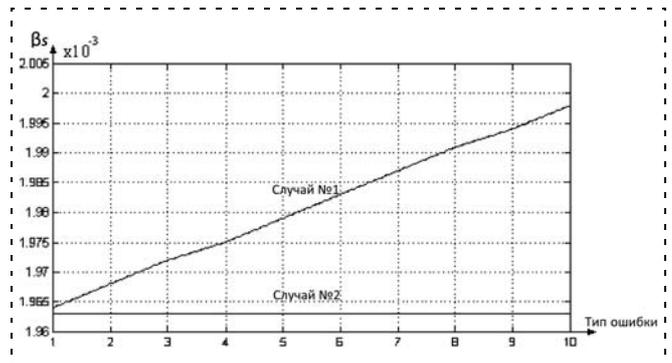


Рис. 3. Вероятности ошибок для первого и второго случаев для варианта I

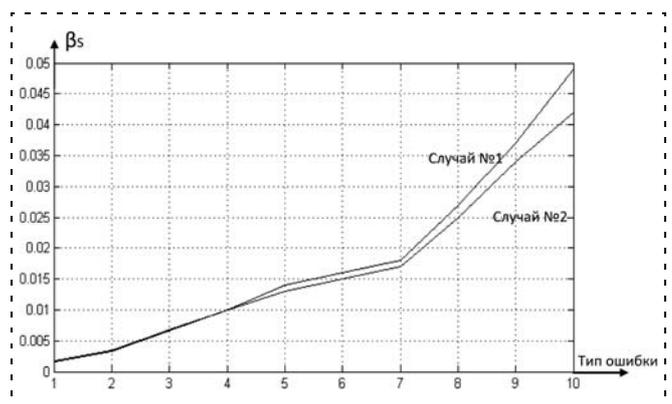


Рис. 4. Вероятности ошибок для первого и второго случаев для варианта II

Таблица 1

Исходные данные и конечные результаты для варианта I

Тип ошибки $i$	Заданная вероятность $i$ -го типа ошибки $\beta_{ji}$	Результирующая вероятность $i$ -го типа ошибки $\beta_{Si}$	
		Случай 1	Случай 2
0	0,999	0,980189	0,98
1	0,0001	0,001964	0,001963
2	0,0001	0,001968	0,001963
3	0,0001	0,001972	0,001963
4	0,0001	0,001975	0,001963
5	0,0001	0,001979	0,001963
6	0,0001	0,001983	0,001963
7	0,0001	0,001987	0,001963
8	0,0001	0,001991	0,001963
9	0,0001	0,001994	0,001963
10	0,0001	0,001998	0,001963

Таблица 2

Исходные данные и конечные результаты для варианта II

Тип ошибки $i$	Заданная вероятность $i$ -го типа ошибки $\beta_{ji}$	Результирующая вероятность $i$ -го типа ошибки $\beta_{Si}$	
		Случай 1	Случай 2
0	0,99	0,817907	0,832
1	0,0001	0,001654	0,001681
2	0,0002	0,003317	0,003361
3	0,0004	0,006673	0,006723
4	0,0006	0,01	0,01
5	0,0008	0,014	0,013
6	0,0009	0,016	0,015
7	0,001	0,018	0,017
8	0,0015	0,027	0,025
9	0,002	0,037	0,034
10	0,0025	0,049	0,042

чения исходных данных по значениям вероятностей безошибочной работы и вероятностей различных типов ошибок необходимо [2] проведение отдельных исследований по каждому виду деятельности отдельно.

**Интервальные оценки исходных вероятностей**

На ранних стадиях проектирования сложных эргатических систем различного назначения при оценке деятельности оператора вероятности правильного (безошибочного) выполнения им различных операций заранее неизвестны. Для получения предварительных числовых оценок этих вероятностей привлекаются соответствующие эксперты, которые могут указать лишь интервал их нахождения (верхнее и нижнее значения). Проведем анализ ТФС, состоящих из двух последовательных рабочих операций (рис. 5).

Будем считать, что вероятности безошибочного выполнения операций ( $\beta_1$  и  $\beta_2$ ) являются случайными величинами, для которых известны (даны экс-

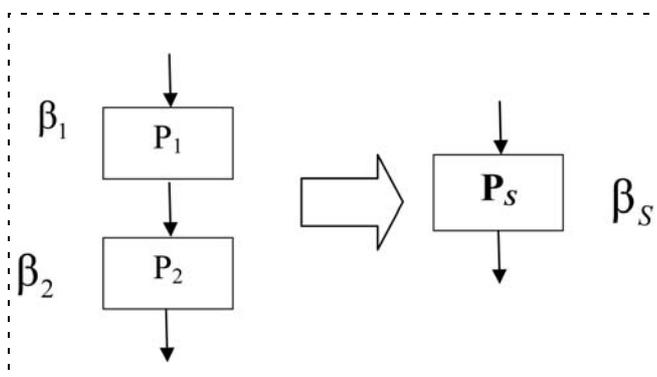


Рис. 5. Две рабочие операции и агрегированная рабочая операция

пертами) лишь границы их средних, что выражается следующими формулами:

$$\underline{b_1} \leq \int_0^1 \int_0^1 b_1 \rho(b_1, b_2) db_1 db_2 \leq \overline{b_1}; \quad (4)$$

$$\underline{b_2} \leq \int_0^1 \int_0^1 b_2 \rho(b_1, b_2) db_1 db_2 \leq \overline{b_2}, \quad (5)$$

где  $\rho(b_1, b_2)$  — совместная плотность распределения вероятностей случайных величин  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Вероятность безошибочной работы системы обозначим  $\beta_S$ . Ставится задача получения границ для  $\beta_S$ , аналогичных (4) и (5). Если обе рабочие операции (рис. 5) независимы, т. е.  $\rho(b_1, b_2) = \rho_1(b_1)\rho_2(b_2)$ , то выполняется соотношение

$$\underline{b_1} \underline{b_2} \leq \beta_S \leq \overline{b_1} \overline{b_2}. \quad (6)$$

Если в ТФС последовательно выполняемые рабочие операции, число рабочих ТФЕ больше двух и выполнение также независимо, то результирующая формула аналогична.

Для зависимого выполнения операций задача поиска нижней и верхней границ для вероятности  $\beta_S$  выглядит следующим образом:

$$\int_0^1 \int_0^1 b_1 b_2 \rho(b_1, b_2) db_1 db_2 \rightarrow \min_{\rho}; \quad (7)$$

$$\int_0^1 \int_0^1 b_1 b_2 \rho(b_1, b_2) db_1 db_2 \rightarrow \max_{\rho}.$$

Если отказаться от требования о независимости выполнения рабочих операций, то для решения задачи (7) в ограничениях (4), (5) можно [3] перейти к двойственным задачам линейного программирования:

$$c + c_1 \underline{b_1} - d_1 \overline{b_1} + c_2 \underline{b_2} - d_2 \overline{b_2} \rightarrow \max;$$

$$c + c_1 b_1 - d_1 b_1 + c_2 b_2 - d_2 b_2 \leq b_1 b_2; \quad (8)$$

$$c + c_1 \overline{b_1} - d_1 \underline{b_1} + c_2 \overline{b_2} - d_2 \underline{b_2} \rightarrow \min;$$

$$c + c_1 b_1 - d_1 b_1 + c_2 b_2 - d_2 b_2 \geq b_1 b_2; \quad (9)$$

$$c \in R; c_1, c_2, d_1, d_2 \geq 0. \quad (10)$$

Задача (8) с ограничениями (10) решается для определения нижнего значения вероятности безошибочного выполнения операций, задача (9) с ограничениями (10) — для верхнего значения вероятности безошибочного выполнения операций.

Решение этих задач в представленном виде контрпродуктивно, так как получается бесконечное множество ограничений.

В соответствии с подходом, изложенным в работе [3], показано, что число ограничений можно значительно уменьшить и привести задачи (8) и (9) к следующему виду:

$$\begin{aligned} -c_0 + c_1 \underline{b}_1 - d_1 \overline{b}_1 + c_2 \underline{b}_2 - d_2 \overline{b}_2 &\rightarrow \max; \\ -c_0 + c_1 - d_1 &\leq 0; \\ -c_0 + c_2 - d_2 &\leq 0; \\ -c_0 + c_1 - d_1 + c_2 - d_2 &\leq 1; \\ c_0, c_1, d_1, c_2, d_2 &\geq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} c + c_1 \overline{b}_1 - d_1 \underline{b}_1 + c_2 \overline{b}_2 - d_2 \underline{b}_2 &\rightarrow \min; \\ c + c_1 - d_1 &\geq 0; \\ c + c_2 - d_2 &\geq 0; \\ c + c_1 - d_1 + c_2 - d_2 &\geq 1; \\ c, c_1, d_1, c_2, d_2 &\geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Решение задач (11) и (12) с учетом соответствующих ограничений дает возможность получить верхнюю и нижнюю границы для средней вероятности безошибочного выполнения двух зависимых рабочих операций. Данный подход может явиться основой для оценки безошибочного выполнения произвольного числа последовательно выполняемых зависимых рабочих операций.

### Заключение

1. Учет различных типов ошибок необходим ввиду неодинаковости их последствий для функционирования системы в целом.

2. Оценка средних вероятностей правильного выполнения алгоритма деятельности в целом необходима на ранних стадиях проектирования сложных эргатических систем.

3. Предложенный подход позволяет, используя ТФЕ, введенные в обобщенном структурном методе и его развитии — функционально-структурной теории описания и оценки дискретных алгоритмов деятельности, проводить оценку безошибочности алгоритмов деятельности, в которых возможны ошибки различных типов или неизвестны точные значения вероятностей правильного выполнения отдельных операций.

4. Для конкретных ТФС необходимо разработать методику вывода результирующих зависимостей для случаев различных ошибок.

5. Для конкретных ТФС необходимо разработать подход для получения верхних и нижних оценок средних вероятностей безошибочного выполнения.

### Список литературы

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания: Справочник / Под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 512 с.
2. Падерно П. И., Попечителей Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителя. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. 288 с.
3. Уткин Л. В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007. 404 с.
4. Ротштейн А. П. Алгебра алгоритмов и нечеткая логика в анализе надежности систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 2. С. 91–103.

## ИНФОРМАЦИЯ

С 9 по 11 октября 2012 г.  
в Санкт-Петербурге в ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
в рамках 5-й Российской мультikonференции по проблемам управления состоится  
**научно-техническая конференция**

### «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ, ЭРГАТИЧЕСКИХ, ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ»

#### Тематика конференции

- **Управление в технических системах:** детерминированные системы; стохастические системы и идентификация; управление технологическими процессами; технические средства управления и др.
- **Мехатронные и эргатические системы:** управление и интеллектуальные технологии в мехатронных системах; человеко-машинный интерфейс и управление в эргатических системах; теория и практика робототехнических систем; проблемно-ориентированные мехатронные и эргатические системы и др.
- **Организационные системы:** управление в активных системах; оптимизационные модели и методы в организационном управлении; системы управления целевыми программами; механизмы управления промышленными предприятиями и коммерческими компаниями и др.
- **Адаптивное, коммуникационно-сетевое и интеллектуальное управление:** математическая теория группового и коммуникационно- сетевого управления; искусственный интеллект, когнитивистика, смарт-системы и управление; технологии и средства сетецентрического управления; управление сетевыми инфраструктурными системами и др.

*Дополнительная и контактная информация:*  
тел.: (495) 335-23-53 e-mail: ivbar@ipu.ru <http://uteoss2012.ipu.ru/>

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

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

**А. В. Ушаков**, проф., д-р техн. наук,  
ushakov-AVG@yandex.ru,

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

## **Представление производственной деятельности антропокомпонента — оператора непрерывной динамической моделью с интервальными параметрами**

*Решается задача представления производственной деятельности антропокомпонента — оператора в виде передаточной функции с интервальными значениями ее параметров. Предложенная модель используется для оценки влияния интервальности параметров на результаты производственного процесса.*

**Ключевые слова:** антропокомпонент, оператор, производство, кривая изменения производительности труда, экспоненциальная аппроксимация, передаточная функция с интервальными параметрами

### **Введение. Постановка задачи**

Рассматриваются проблемы модельного представления антропокомпонента (АК) — оператора в составе сложной динамической системы, представляющей собой производственный процесс. При построении модельного представления учитывался накопленный опыт [1, 2, 3] специалистов по управлению системами с антропокомпонентами в их составе. Отметим, что при любой степени строгости по вопросу подбора 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.

На настоящий момент АК функционально разделены на две группы. Первую группу составляют АК "информационного типа" (АКИТ), которые в процессе своего функционирования обрабатывают информационные потоки. К этой группе относятся

пилоты военной и гражданской авиации, водители военных (танки, самоходные установки, военные корабли) и гражданских (автобусы, поезда, паромы) транспортных средств. Ко второй группе относятся АК, задействованные в задачах обработки материальных потоков (АКОМП) в процессе производства.

Пока основное внимание специалисты по человеко-машинным системам обращают на АК первой группы. В отечественной науке на настоящий момент своими результатами выделяются научные школы Московского авиационного института (И. Е. Цибулевский, М. М. Сильвестров, Л. М. Козиоров, Г. Г. Себряков [4, 5, 6]) и Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (К. А. Пупков, А. С. Ющенко, А. Д. Устюжанин [7]). Представители обеих школ рассматривают АК информационного типа как участника процесса слежения в широком смысле понимания этого термина. Наибольших результатов в изучении АК этого типа достигли специалисты, занимающиеся изучением АК в составе авиационных систем [6, 7].

Исследованием АК, занятых в обработке материальных потоков в процессе производства, в основном заняты специалисты по научной организации труда, планированию производства и эргономике. Для них, как правило, представляют интерес графики, иллюстрирующие процесс изменения производительности труда в течение рабочей смены, влияние на нее организации рабочих мест, рекреационных мероприятий и т. д. Фактический статистический материал, основанный на хронометраже деятельности и эргономических исследованиях АК этого типа достаточно обширный. Однако формализация деятельности АК на уровне описания с помощью передаточных функций и моделей аппарата пространства состояния находится на низком уровне.

### **1. Построение непрерывной динамической модели с интервальными параметрами производственной деятельности антропокомпонента — оператора на основе типовой кривой изменения его производительности труда**

Математическая модель АКОМП строится на основе экспоненциальных аппроксимаций отдельных участков типовой кривой изменения производительности труда (ПТ) [8], примерный вид которой представлен на рис. 1.

На кривой (рис. 1) можно выделить следующие точки и интервалы изменения ПТ АК в течение рабочей смены: "РНТД" — точка реального начала трудовой деятельности, "РНТД — ВР" — интервал "вработывания (ВР)"; "ВР — ОЭ" — интервал его оптимальной эффективной (ОЭ) деятельности; "ОЭ — ТКУ" — интервал прогрессирующей усталости с точкой критической усталости (ТКУ); "ТКУ — ПК" — рекреационный интервал (обеденный перерыв) с точкой "полной" компенсации (ПК).

Кривая на рис. 1 по данным работы [8] характеризуется количественными показателями: длительность интервала ВР в зависимости от индивидуальных свойств АК составляет интервальную величину 12...30 мин; максимальная производительность АК поддерживается до конца третьего часа обеих рабочих полумен, а к концу четвертого часа каждой из полумен ПТ падает на 20...40 %. Эти величины в дальнейшем используются при построении интервального модельного представления АКОМП.

Если в кривой на рис. 1 исключить обеденный перерыв, а также локальный всплеск ПТ за счет "второго дыхания" в преддверии обеденного перерыва и учесть, что за время обеденного перерыва продолжительностью не менее получаса происхо-

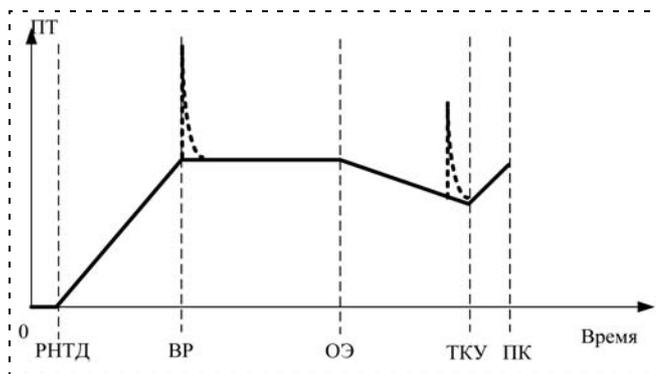


Рис. 1. Типовая кривая изменения производительности труда АК в течение рабочей полумены и восстановление ее в рекреационный период

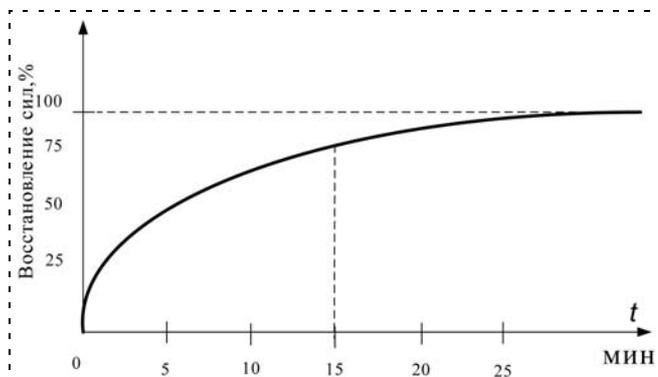


Рис. 2. Кривая восстановления работоспособности в обеденный перерыв

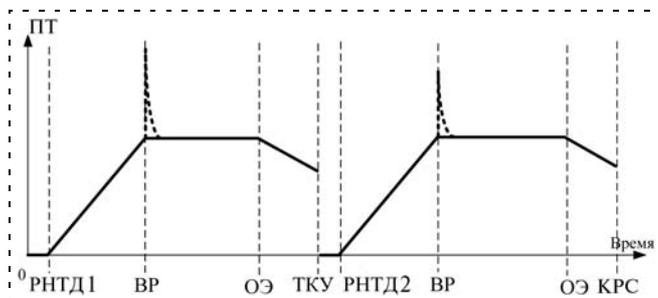


Рис. 3. Кривая изменения производительности труда АК в течение рабочей смены с учетом полного ее восстановления в рекреационный период

дит практически полное восстановление утраченных сил (рис. 2), то получится кривая (рис. 3) ПТ, составленная из двух идентичных фрагментов, описывающих процесс изменения ПТ за цикл в четыре часа каждая, образующих дневную рабочую смену АКОМП.

На рис. 3 обозначения совпадают с обозначениями на рис. 1 с точностью до индексов, обозначающих первую "1" и вторую "2" полумены. Кривая на рис. 3 как в первой рабочей полумене, так и во второй кусочно допускает экспоненциальную аппроксимацию. Так, участки "0—РНТД1—ВР" и "ТКУ—РНТД2—ВР" вработывания в полуменах могут быть аппроксимированы переходной функцией (ПРФ)  $\tilde{h}_1(t)$  звена с передаточной функцией (ПФ)

$$\tilde{W}_1(s) = [k] \frac{1}{([\tilde{T}_1]s + 1)} e^{-[\tau_1]s}. \quad (1)$$

Процесс устания АКОМПТ на участках кривой "ВР—ОЭ—ТКУ" и "ВР—ОЭ—КРС" полумен может быть аппроксимирован ПРФ  $\tilde{h}_2(t)$  звена с ПФ

$$\tilde{W}_2(s) = [k] \frac{1}{([\tilde{T}_2]s + 1)} e^{-[\tau_2]s}. \quad (2)$$

Кривую изменения ПТ в течение полумены представим как разность  $\tilde{h}(t) = \tilde{h}_1(t) - \tilde{h}_2(t)$  кривых нарастания ПТ и нарастания усталости, которая представляет собой ПРФ звена с ПФ

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\text{ПТ}}(s) &= \tilde{W}_1(s) - \tilde{W}_2(s) = \\ &= [k] \left\{ \frac{1}{([\tilde{T}_1]s + 1)} e^{-[\tau_1]s} - \frac{1}{([\tilde{T}_2]s + 1)} e^{-[\tau_2]s} \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

В передаточных функциях (1)—(3)  $[k]$  — ПТ, представляемая в относительной форме, т. е. в долях сменного задания, принимаемого за единицу, выполняемых за час. Запись  $[\alpha]$  в (1)—(3) означает, что системный параметр  $\alpha$  является интервальным [9]. Передаточная функция (3) является ПФ системы АКОМП "сменное задание — производительность труда", ПФ АКОМП "сменное задание — готовая продукция (ГП)" в силу того, что между ПТ и готовой продукцией имеется интегральная связь, получает представление

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\text{ГП}}(s) &= \\ &= [k] \left\{ \frac{1}{([\tilde{T}_1]s + 1)} e^{-[\tau_1]s} - \frac{1}{([\tilde{T}_2]s + 1)} e^{-[\tau_2]s} \right\} \frac{1}{s}. \quad (4) \end{aligned}$$

Передаточная функция (4), описывающая производственную деятельность АКОМП, содержит для исследователя заметные системные неудобства в

$\nu$	1	2	3	4	5	6	10	20	40
$\tau$	0,0513T	0,35T	0,82T	1,36T	1,95T	2,6T	5,4T	13,25T	30,15T
$t_{\text{п}}$	3T	4,75T	6,3T	7,76T	9,16T	10,52T	15,71T	27,9T	51T
$t_{\text{п}}/\tau$	58,48	13,57	7,68	5,7	4,7	4,04	2,91	2,1	1,69

силу наличия в составе ПФ (4) ПФ звеньев чистого запаздывания. Возникшую трудность можно обойти, если учесть, что ПФ звеньев чистого запаздывания мультипликативно агрегируются с ПФ аperiодических звеньев. Исследования показывают,

что удачная аппроксимация ПРФ  $h_{\Gamma\Pi}(t, \tilde{T}_i, \tau_i)$  звена с ПФ  $\frac{1}{(\tilde{T}_i s + 1)} e^{-\tau_i s}$  достигается с помощью ПРФ

$\hat{h}(t, T_i, \nu_i)$  звена с биномиальной ПФ  $\frac{1}{(T_i s + 1)^{\nu_i}}$  так,

что оказывается справедливой замена  $\frac{1}{(\tilde{T}_i s + 1)} e^{-\tau_i s}$

на  $\frac{1}{(T_i s + 1)^{\nu_i}}$ . Значения величин  $T_i$  и  $\nu_i$  могут быть

определены на основании данных табл. 1 и кривых на рис. 4, полученных в MATLAB с расширением *Simulink*.

Значения величин  $\tau$  и  $t_{\text{п}}$  фиксировались как результаты наблюдения выполнения условий  $\tau = \arg\{\hat{h}(t, T, \nu) = 0,05\}$  и  $t_{\text{п}} = \arg\{\hat{h}(t, T, \nu) = 0,95\}$ .

В результате передаточная функция (4) получает представление

$$\tilde{W}(s) = [k] \left\{ \frac{1}{([T_1]s + 1)^{\nu_1}} - \frac{1}{([T_2]s + 1)^{\nu_2}} \right\} \frac{1}{s}. \quad (5)$$

Если учесть возможность проявления АКОМП форсирующих свойств, когда имеется заметный запас сил в начале каждой полусмены, то ПФ АКОМП "сменное задание—готовая продукция" (5) примет окончательный вид

$$W(s) = [k] \left\{ \frac{[T_3]s + 1}{([T_1]s + 1)^{\nu_1}} - \frac{1}{([T_2]s + 1)^{\nu_2}} \right\} \frac{1}{s}. \quad (6)$$

Прежде чем задавать интервальные значения параметров передаточной функции АКОМП (6) в процессе осуществления производственной деятельности, остановимся на представлениях интервальных чисел. Интервальное число (ИЧ)  $[\alpha]$  можно представить в формах

$$[\alpha] = [\underline{\alpha}, \bar{\alpha}] = \alpha_0 + [\Delta\alpha] = \alpha_0 + [\underline{\Delta\alpha}, \overline{\Delta\alpha}], \quad (7)$$

где  $\underline{\alpha}$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\alpha_0$ ,  $[\Delta\alpha]$  — соответственно левая и правая угловые реализации ИЧ, медианная и интервальная составляющая ИЧ с равными по модулю левой  $\underline{\Delta\alpha}$  со знаком "минус" и правой  $\overline{\Delta\alpha}$  со знаком "плюс" угловыми реализациями. Представление (7) ИЧ позволяет записать систему равенств

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0,5(\underline{\alpha} + \bar{\alpha}); \\ \underline{\Delta\alpha} &= \underline{\alpha} - \alpha_0; \quad \overline{\Delta\alpha} = \bar{\alpha} - \alpha_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) позволяют ввести такую характеристику ИЧ, как оценка  $\delta_I(\alpha)$  относительной интервальности ИЧ  $[\alpha]$ , задаваемую соотношением

$$\delta_I(\alpha) = \overline{\Delta\alpha}/\alpha_0 = -\underline{\Delta\alpha}/\alpha_0. \quad (9)$$

Соотношение (9) позволяет записать ИЧ  $[\alpha]$  в формах

$$[\alpha] = \alpha_0 + [-\alpha_0 \delta_I(\alpha), \alpha_0 \delta_I(\alpha)] = \alpha_0 \{1 + [-\delta_I(\alpha), \delta_I(\alpha)]\}. \quad (10)$$

Для формирования ПФ (5)—(6) на основе ПФ АКОМП (4), построенной в соответствии с кривой рис. 3, надо следовать следующей процедуре:

- построить модельное представление производственной деятельности АКОМП в форме ПФ (4) на основе кривой на рис. 3;

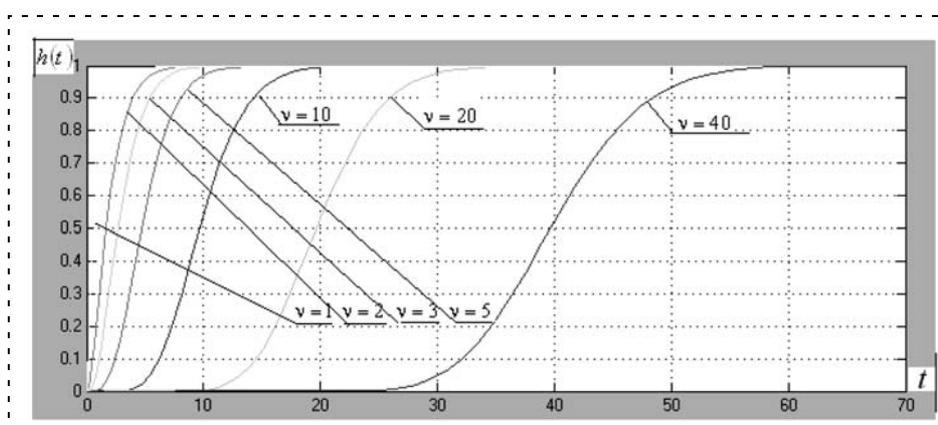


Рис. 4. Кривые переходных функций  $\hat{h}(t, T, \nu)$  звеньев с биномиальной передаточной функцией  $(Ts + 1)^{-\nu}$ ,  $T = 1$  с

- вычислить медианные значения параметров передаточной функции (4)  $\tilde{T}_{10}, \tau_{10}, \tilde{T}_{20}, \tau_{20}$  и вычислить отношения  $t_{п10}/\tau_{10}$  и  $t_{п20}/\tau_{20}$ ;
- по полученным отношениям с помощью табл. 1 выбрать значения  $v_1$  и  $v_2$ ;
- по значениям  $v_1$  и  $v_2$ , а также аналитическим связям  $t_{п}$  и  $T$  для каждого  $v$  из табл. 1 определить медианные значения  $T_{10}$  и  $T_{20}$  постоянных времени аппроксимирующих ПФ (5) и (6);
- положить неравенство  $\delta_I(\alpha) \leq 0,25$  для оценки  $\delta_I(\alpha)$  относительной интервальности для всех интервальных значений параметров ПФ АКОМП;
- представить интервальные параметры (ИП) моделей (5) и (6) в форме (10);
- медианное значение  $k_0$  оценить экспериментально в оболочке MATLAB путем контроля выполнения соотношения

$$k_0 = \arg\{y(t, T_{10}, T_{20}, T_{30} = 0, k_0)|_{t=8, g(t)=1} = 1\}, (11)$$

где равенство  $t = 8$  записано в часах;

Таблица 2

Параметр	$v_1$	$T_{10}$	$v_2$	$T_{20}$	$k_0$	$T_{30}$
Значение	3	0,055 ч	6	0,9 ч	0,1405 ч <sup>-1</sup>	0,275 ч

Определены экспериментально

- значение  $\overline{T}_3$ , соответствующее ситуации использования форсирующих свойств АКОМП, задать в форме  $\overline{T}_3 = 3\overline{v_1 T_1}$  для трехкратного форсирования производительности труда АКОМП в начале каждой из рабочих полусмен.

Следуя предложенной процедуре и опираясь на численные характеристики кривой на рис. 1, можно получить медианные значения параметров ПФ(6), представленные в табл. 2.

## 2. Компьютерный эксперимент на основе полученной модели с интервальными параметрами производственной деятельности АКОМП

Компьютерный эксперимент по изучению динамики производственной деятельности АКОМП осуществляли на основе его интервальной математической модели в виде (6) в оболочке MATLAB с расширением *Simulink* в составе бинарной структуры — минимальной ячейки более крупного производственного коллектива, но достаточной для экстраполяции полученных на этой структуре результатов на весь коллектив в целом. Были поставлены задачи:

- установить факт адекватности модели АКОМП в виде передаточной функции (6) с ИП кривой на рис. 3;
- оценить медианное значение  $k_0$  интервальной производительности  $[k]$  с помощью контроля выполнения соотношения (11);

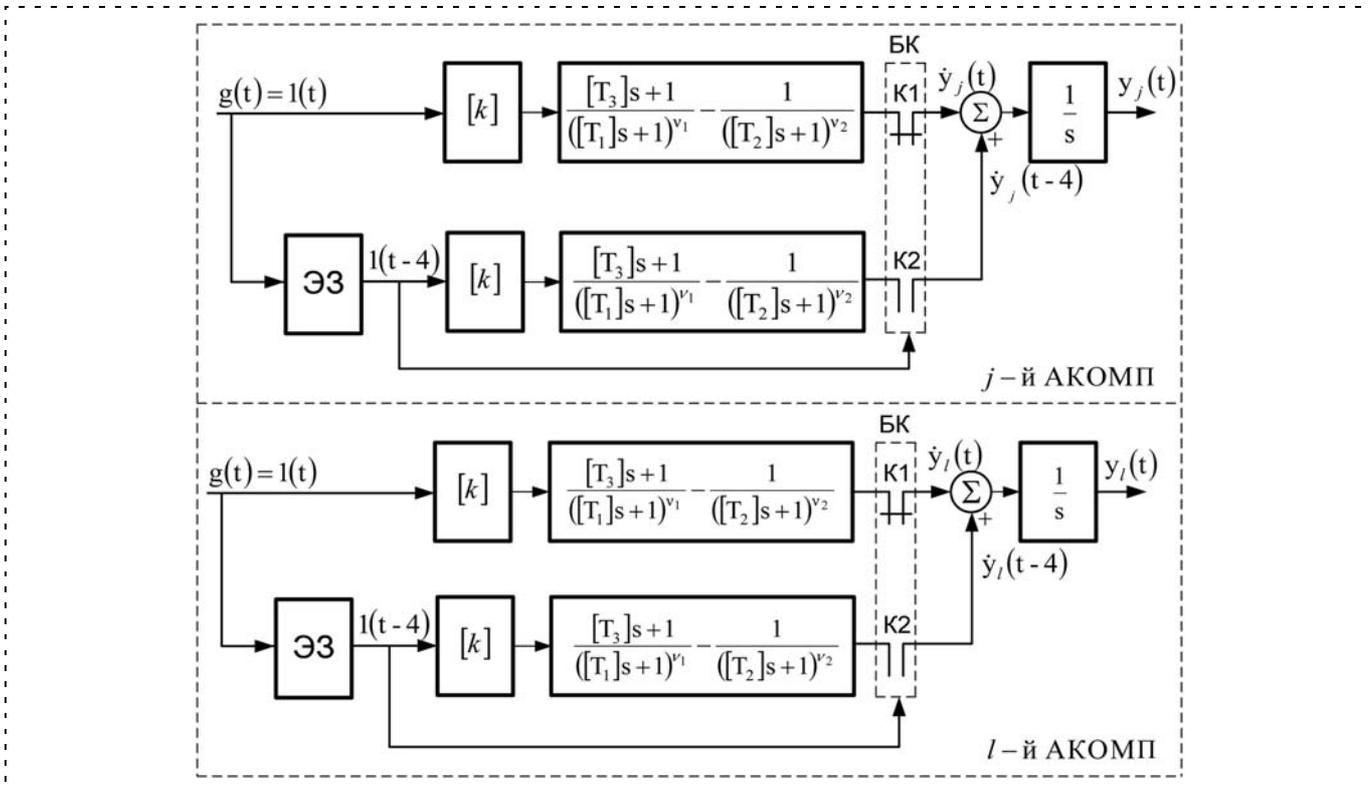


Рис. 5. Схема моделирования производственной деятельности структуры из двух АКОМП описываемых ПФ вида (6)

- оценить влияние интервальности параметров динамической модели (6) на результаты производственной деятельности АКОМП, фиксируемые по окончании рабочей смены;
- провести анализ результатов производственной деятельности АКОМП при наиболее и наименее благоприятных сочетаниях угловых реализаций ИП динамической модели (6);
- определить относительную интервальность ИП динамической модели (6) АКОМП, при которой средствами использования форсирующих свойств АК в начале каждой рабочей полусмены возможна полная компенсация негативного проявления интервальности на результаты производственной деятельности.

Схема моделирования производственной деятельности АКОМП, описываемой ПФ (6) в составе бинарной структуры, сформированной из  $j$ -го и  $l$ -го АКОМП, приведена на рис. 5. Построение модели производственного процесса с участием АКОМП в виде аддитивной структуры динамических систем, описывающих этот процесс последовательно во времени каждой из систем в течение

одной из полусмен рабочего дня предоставляет исследователям дополнительные возможности для:

- исследования влияния организации рекреационного интервала на ход производственного процесса во второй рабочей полусмене, а следовательно, на результаты всего рабочего дня;
- исследования эффективности использования вахтенного способа организации производственного процесса, при котором АКОМП, задействованные в нем, сменяют друг друга каждую полусмену.

Ниже приводятся кривые, иллюстрирующие графически результаты решения поставленных задач (рис. 6, 7).

Кривые на рис. 6 (кривые совпадают) хорошо аппроксимируют кривые, показанные на рис. 3, подтверждая адекватность модели производственной деятельности АКОМП в виде ПФ (6).

С помощью кривых на рис. 7, а решена задача (11), давшая результат

$$k_0 = \arg\{y(t, T_{10}, T_{20}, T_{30} = 0, k_0)|_{t=8, g(t) = 1} = 1\} = 0,1405 \text{ ч}^{-1}.$$

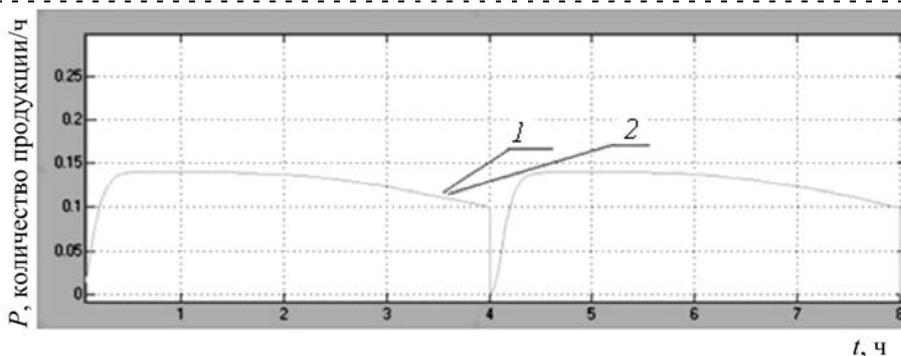


Рис. 6. Кривые изменения производительности труда в течение рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) при медианных значениях параметров ПФ (6)

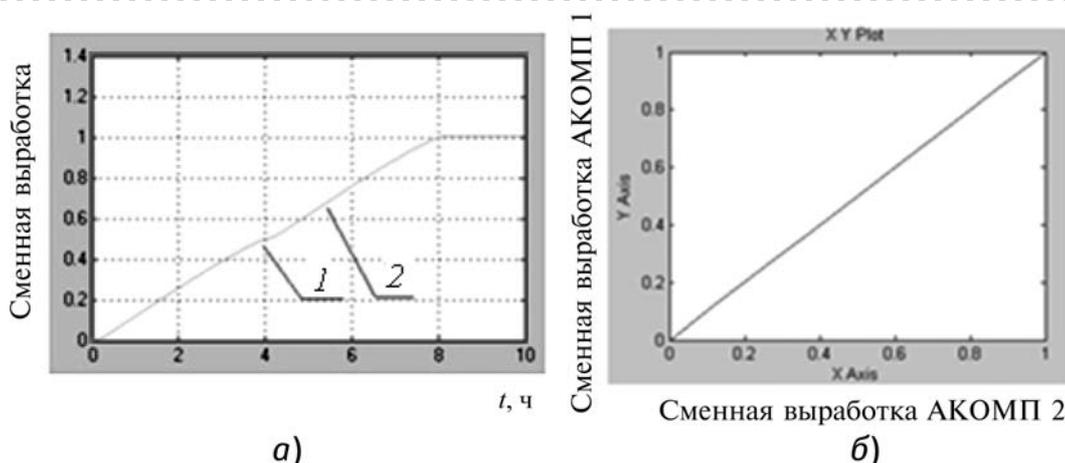


Рис. 7. Кривые реальной сменной выработки в течение полной рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) при медианных значениях ИП ПФ (6) (а); фазовые портреты в пространстве « $y_j(t)$ — $y_l(t)$ » бинарного модуля из двух АКОМП при медианных значениях параметров, реальной сменной выработки в течение полной рабочей смены (б)

Следует ожидать, что при угловых реализациях ИП ПФ (6), все кривые — производительности труда, реальной сменной выработки за 8 ч и фазовые портреты — будут заметно отличаться от случая медианных значений параметров (рис. 8, 9).

Рассмотрим ситуацию, когда модель одного АКОМП характеризуется наиболее благоприятным сочетанием угловых реализаций параметров ПФ (6), а другого АКОМП — наименее благоприятным.

Очевидно, наиболее благоприятное сочетание угловых реализаций интервальных значений параметров ПФ (6) характеризуется: максимальной производительностью, наименьшим временем вработывания и наибольшей длительностью состояния отсутствия усталости. Наименее благоприятное сочетание угловых реализаций ИЗ параметров ПФ (6) характеризуется: минимальной производительностью, наибольшим временем вработывания

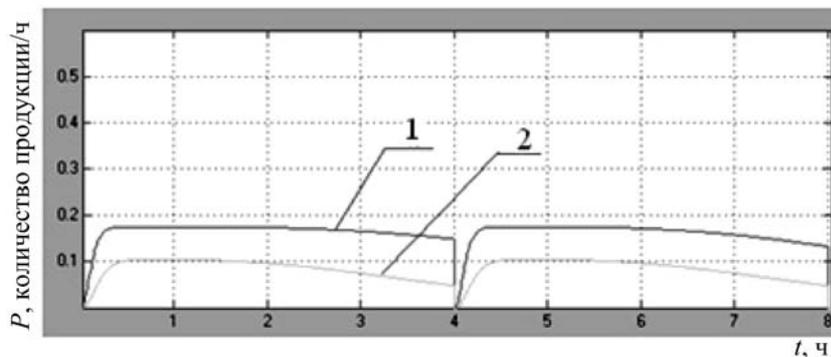


Рис. 8. Кривые изменения производительности труда в течение рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) соответственно при всех правых угловых реализациях и при всех левых реализациях интервальных значений всех параметров ПФ (6)

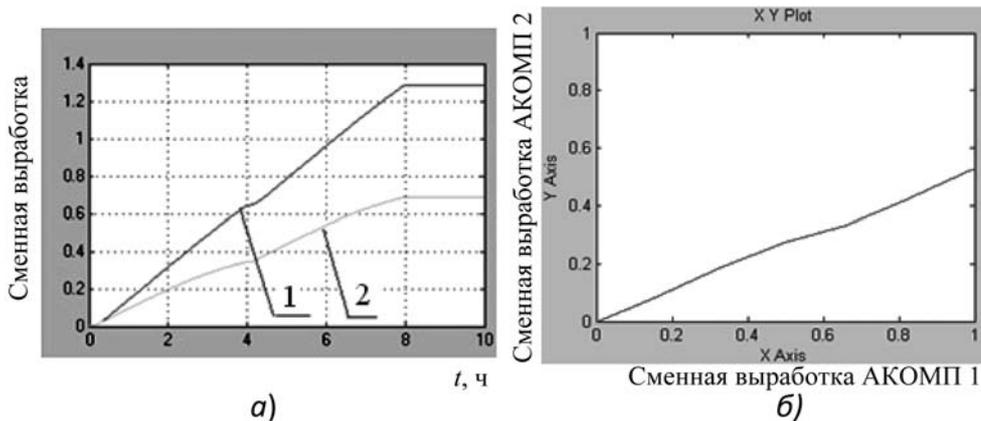


Рис. 9. Кривые реальной сменной выработки в течение полной рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) при тех же угловых реализациях интервальных значений параметров ПФ (6), что и кривые на рис. 8 (а); фазовые портреты в пространстве " $y_j(t) - y_l(t)$ " бинарного модуля из двух АКОМП при тех же угловых реализациях интервальных значений (ИЗ) параметров ПФ (6), что и кривые на рис. 8 и на рис. 9, а (б)

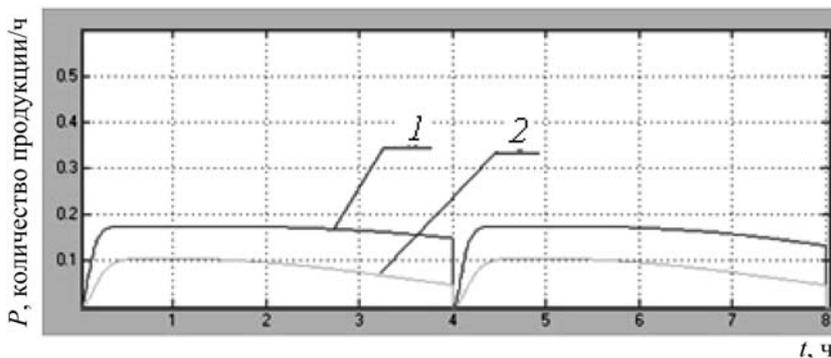


Рис. 10. Кривые изменения производительности труда в течение рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) соответственно при наиболее благоприятном сочетании угловых реализаций и наименее благоприятном сочетании угловых реализаций ИЗ всех параметров ПФ (6)

и наименьшей длительностью состояния отсутствия усталости (рис. 10, 11).

Рассмотрим теперь задачу экспериментального определения величины оценки  $\delta_1(\alpha) = \arg\{y_j(t=8) = y_l(t=8) = 1\} \Big|_{T_3 = \bar{T}_3}$  относительной интервальнос-

ти интервальных значений параметров ПФ (6) при их наименее благоприятном сочетании, негативный эффект проявления которых может быть полностью скомпенсирован кратковременным использованием форсирующих свойств АКОМП (рис. 12, 13).

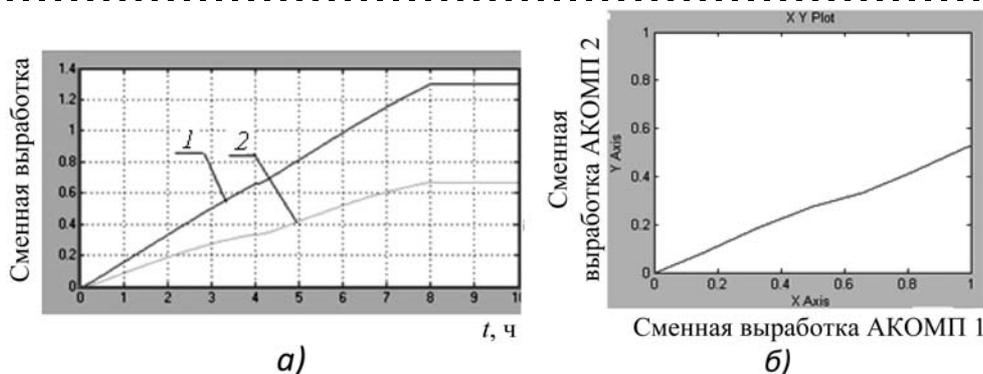


Рис. 11. Кривые реальной сменной выработки в течение рабочей смены  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) при тех же угловых реализациях интервальных значений параметров ПФ (6), что и кривые на рис. 10 (а); фазовые портреты в пространстве " $y_j(t) - y_l(t)$ " бинарного модуля из двух АКОМП при тех же угловых реализациях интервальных значений параметров ПФ (6), что и кривые на рис. 10 и на рис. 11, а (б)

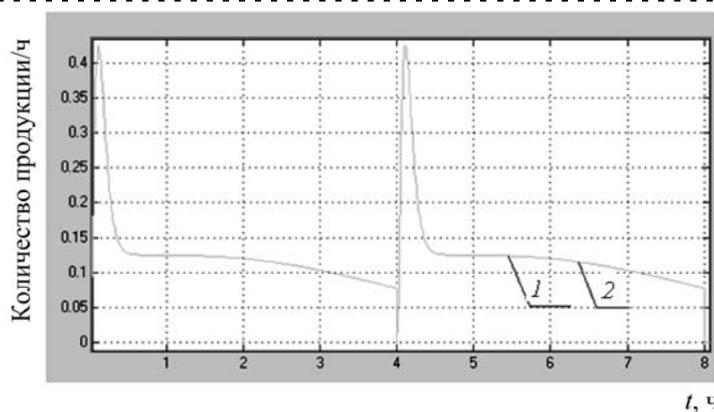


Рис. 12. Кривые изменения производительности труда в течение рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) соответственно при наименее благоприятном сочетании угловых реализаций интервальных значений всех параметров ПФ (6) и правом угловом значении  $\bar{T}_3 = 0,55$  ч, гарантирующего трехкратное кратковременное форсирование производительности труда

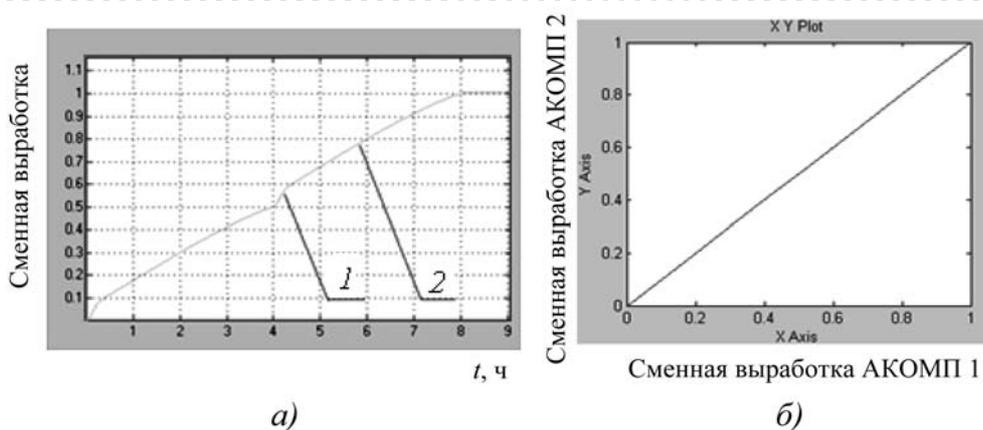


Рис. 13. Кривые реальной сменной выработки в течение рабочей смены для  $j$ -го АКОМП (1) и  $l$ -го АКОМП (2) при наименее благоприятных сочетаниях угловых реализаций ИЗ параметров ПФ (6) и использовании форсирующих свойств АКОМП (а); фазовые портреты в пространстве " $y_j(t) - y_l(t)$ " бинарного модуля из двух АКОМП при тех же угловых реализациях интервальных значений параметров ПФ (6), что и на рис. 13, а (б)

Задача поиска  $\delta_1(\alpha) = \arg\{y_f(t=8) = y_\lambda(t=8) = 1\}|_{T_3 = \bar{T}_3}$  получила свое решение в форме  $\delta_1(\alpha) = \arg\{y_f(t=8) = y_\lambda(t=8) = 1\}|_{T_3 = 0,55 \text{ ч}} = 0,11$  (11 %), при этом использование форсирующих свойств АКОМП происходило в течение интервала  $\Delta t = 0,44$  ч в начале каждой рабочей полусмены.

### Заключение

Модельная среда, представленная схемой рис. 5, позволит выполнить заказ специалистов по научной организации труда и управлению производством на предмет оценки допустимой интервальности параметров АКОМП, фактор которой приводит к невыполнению сменного задания всеми АКОМП производства, но которое может быть скомпенсировано допустимым использованием форсирующих свойств АКОМП. Полученную совокупность результатов компьютерного моделирования бинарного модуля (рис. 5), составленного из двух АКОМП, производственная деятельность которых описывается ПФ (6) с ИЗ параметров, необходимо передать специалистам отдела научной организации труда и управления производством предприятия (фирмы) на предмет вынесения решения о необходимости: более тщательного подбора кадрового состава работников; дополнительного тренинга АКОМП; возможной коррекции индивидуальных производ-

ственных заданий; принятия структурного решения в виде перераспределения сменных заданий в составе бригады АКОМП; внедрения дополнительных производственных мощностей; дополнительных складских помещений; изменения кадрового состава подразделения; возможности организации бесскладового производства.

### Список литературы

1. Ефремов А. В., Оглоблин А. В., Кошеленко А. В. Закономерности характеристик действий человека-оператора в задачах непрерывного управления // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 7. С. 2—10.
2. Шеридан Т. Б., Феррел У. Р. Системы человек — машины. М.: Машиностроение, 1980.
3. Зайцев В. С. Системный анализ операторской деятельности. М.: Радио и связь, 1990.
4. Себряков Г. Г. Моделирование деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 4. С. 17—29.
5. Цибулевский И. Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981.
6. Себряков Г. Г. Характеристики деятельности человека-оператора в динамических системах слежения и наведения летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 11. С. 2—8.
7. Пупков К. А., Устюжанин А. Д. Оптимизация взаимосвязи человека и техники при управлении космическими объектами // Матер. 17 Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 2010. С. 238—240.
8. Шипилов А. И., Шипилова О. А. Высокая работоспособность персонала — забота кадровика // Кадры предприятия. 2003. № 3. С. 7—15.
9. Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986.

## ИНФОРМАЦИЯ

18—20 декабря 2012 г.  
в г. Миассе Челябинской обл. состоится

## XXXII Всероссийский симпозиум по механике и процессам управления

### Организаторы:

Российская академия наук, Министерство обороны РФ, Министерство промышленности и торговли РФ, Федеральное космическое агентство, Министерство образования и науки РФ, Высшая аттестационная комиссия и Межрегиональный совет по науке и технологиям

### Тематические направления симпозиума:

- Механика неоднородных конструкций (методы расчета, проектирования и испытаний)
- Механика жидкости и газа
- Механика деформируемого твердого тела
- Общая и прикладная механика
- Процессы управления
- Машиностроение (конструирование и производство корпусов, двигателей и систем управления вооружений, военной и специальной техники — надежность и ресурс, эффективность и технический уровень, экономика и управление)

Подробная информация и правила оформления доступны на сайте: [www.msnt.pp.ru](http://www.msnt.pp.ru)

Контактная информация:  
Тел.: 8 (3513) 53-67-16, 8 (904) 940-28-71  
Эл. почта: [msnt@mail.ru](mailto:msnt@mail.ru)

УДК 004.896

**И. М. Макаров**, акад. РАН, зав. каф.,

**В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф.,

**С. В. Манько**, д-р техн. наук, проф.,

**М. П. Романов**, д-р техн. наук, проф.,

**Е. Н. Крючков**, инженер,

**Р. В. Кучерский**, аспирант,

**Ю. И. Худак**, д-р физ.-мат. наук, зав. каф.,

cpd@mirea.ru,

МГТУ МИРЭА

## Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах

*Рассматриваются модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах, основанные на использовании аппарата теории конечных автоматов и многокритериального выбора.*

**Ключевые слова:** мультиагентная робототехническая система, групповое управление роботами, конечные автоматы, многокритериальный выбор

**Введение.** Потенциальные преимущества и возможности применения мультиагентных робототехнических систем (МАРС) открывают широкие перспективы для развития множества различных прикладных областей. Исследованию таких систем, в которых выполнение требуемых задач обеспечивается совместными усилиями интеллектуальных автономных роботов, во всем мире уделяется приоритетное внимание. Результаты работ, проводимых по данной тематике в США, Японии, странах Юго-Восточной Азии и Европы опережающими темпами, на практике подтверждают не только реальность, но и целесообразность создания МАРС.

Совокупность основных проблем разработки МАРС так или иначе связана с организацией групповых взаимодействий для достижения общей цели, планированием действий, распределением заданий с учетом имеющихся ресурсов, обеспечением единства информационного пространства на основе технологий сетевой связи, обобщением сенсорной информации и формированием модели обстановки, интеллектуализацией человеко-машинного интерфейса для оперативной постановки прикладных задач на уровне их технологического описания.

Данная статья продолжает цикл авторских публикаций, посвященных проблематике МАРС. В ней предложены модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в группе интеллектуальных автономных роботов при совместном выполнении общих прикладных задач, приводятся результаты моделирования.

**Модели и алгоритмы планирования действий в мультиагентных робототехнических системах.** Планирование целесообразных действий является важнейшим вопросом в теории и практике многоагентных систем. Один из подходов к его решению, активно развиваемый усилиями научной школы члена-корреспондента РАН И. А. Каляева, основан на формировании некоторого функционала, экстремум которого соответствует успешному достижению цели функционирования системы, а многомерный аргумент — действиям агентов по выполнению общей прикладной задачи. Очевидно, что значения аргумента, обеспечивающие экстремум целевого функционала, и будут определять искомый план действий агентов, входящих в состав системы. Применение этого подхода, работоспособность и эффективность которого подтверждается примерами моделирования МАРС различных типов и назначения (включая транспортные [1], складские [2] и боевые [1, 3]), в первую очередь охватывает множество прикладных задач с произвольным порядком выполнения необходимых операций.

Вместе с тем, существует широкий спектр практических задач, решение которых должно подчиняться априорно установленным сценариям и потенциально может также возлагаться на мультиагентные системы, построенные на базе интеллектуальных автономных роботов. К этому классу относятся задачи проведения военных операций, поисково-спасательных, инженерно-строительных, монтажных и других типов работ, предполагающих соблюдение определенной этапности или технологии.

Планирование целесообразных действий МАРС в подобных случаях может быть основано на анализе сценария выполнения поставленной прикладной задачи с контролем его поэтапной реализации. Практическое воплощение такого подхода предполагает наличие соответствующей модели, позволяющей определить текущий набор допустимых действий с учетом фактических результатов функционирования МАРС.

В общем случае сценарии выполнения различных прикладных задач могут быть представлены в виде древовидного графа, вершины которого соответствуют отдельным операциям или этапам, а ду-

ги определяют их технологическую очередность (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Модель процесса выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию может быть сформирована в виде набора соединяемых конечных автоматов со структурой взаимосвязей, адекватно отражающих логику последовательно-параллельной очередности технологических операций.

Следует отметить, что эффективность применения аппарата теории конечных автоматов в такого рода приложениях подтверждается известными работами профессора С. Л. Зенкевича, связанными с координацией действий разнородного робототехнического и технологического оборудования [4, 5].

Главная особенность предлагаемого подхода в отличие от развиваемого в этих работах заключается в формировании автоматной модели, которая регламентирует этапность технологических операций, а не последовательности действий роботов при их выполнении.

Как известно [6], в общем случае конечный автомат задается следующим образом:

$$K = \{U, X, Y, f, h\}, \quad (1)$$

где  $U = (u_1, \dots, u_m)$  — конечный входной алфавит;  $X = (x_1, \dots, x_n)$  — конечный алфавит состояний;  $Y = (y_1, \dots, y_l)$  — конечный выходной алфавит;  $f: X \times U \rightarrow X$  — функция переходов;  $h: X \times U \rightarrow Y$  — функция выходов.

При необходимости конечный автомат можно интерпретировать как динамическую систему, которая под воздействием некоторой управляющей команды  $u$ , поступающей на вход в момент времени  $t$ , изменяет свое текущее состояние  $x$  на новое с формированием соответствующего выходного сигнала  $y$ :

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= f(x(t), u(t)); \\ y(t) &= h(x(t), u(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — продолжительность перехода автомата от одного состояния к другому.

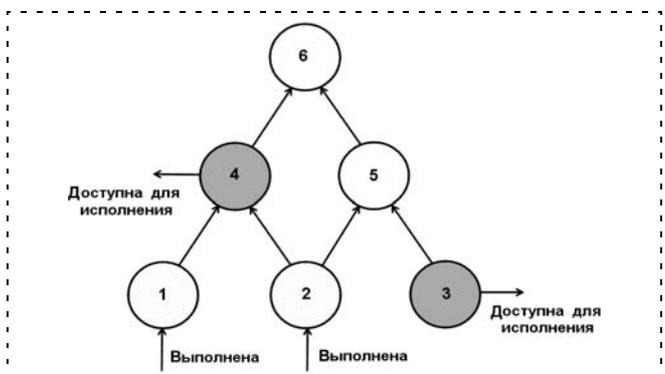


Рис. 2. Выявление доступных для исполнения операций по мере очередности завершения предыдущих на основе контроля за выполнением поставленной прикладной задачи по установленному сценарию

Формирование модели, призванной обеспечивать контрольно-управляющие функции в процессе решения поставленной прикладной задачи и регламентировать порядок ее выполнения, предполагает необходимость описания технологических операций как составных элементов соответствующего сценария. При этом адекватное отражение текущего состояния отработки заданного сценария будет обуславливать выявление доступных для исполнения операций по мере очередности завершения предыдущих. Таким образом, в качестве решающего правила по выявлению доступных для исполнения операций следует рассматривать отсутствие невыполненных предшествующих операций, как показано на рис. 2.

Универсальность представлений (1), (2) позволяет не только описать сами технологические операции в терминах конечных автоматов, но и указать последовательно-параллельную очередность их следования в соответствии с требуемым сценарием на уровне установления необходимых взаимосвязей и согласования алфавитов.

Так, типовой элемент для описания технологической операции в составе сценарной модели выполнения решаемой прикладной задачи может быть представлен конечным автоматом вида (1):

$$K^O = \{U^O, X^O, Y^O, f^O, h^O\}, \quad (3)$$

где  $U^O = (u_0^O, u_1^O, u_2^O)$  — входной алфавит;

$u_0^O$  — входной сигнал о наличии невыполненных операций, предшествующих данной;

$u_1^O$  — входной сигнал об отсутствии невыполненных операций, предшествующих данной;

$u_2^O$  — входной сигнал о завершении данной конкретной операции;

$X^O = (x_0^O, x_1^O, x_2^O)$  — алфавит состояний;

$x_0^O$  — состояние "операция невыполнена";

$x_1^O$  — состояние "операция передана на выполнение";

Таблица 1

Входы	Состояния		
	$x_0^O$	$x_1^O$	$x_2^O$
$u_0^O$	$x_0^O$	$x_1^O$	$x_2^O$
$u_1^O$	$x_1^O$	$x_1^O$	$x_2^O$
$u_2^O$	$x_0^O$	$x_2^O$	$x_2^O$
Выходы	$y_0^O$	$y_1^O$	$y_2^O$

$x_2^O$  — состояние "операция выполнена";

$Y^O = (y_0^O, y_1^O, y_2^O)$  — выходной алфавит;

$y_0^O$  — выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в состоянии "не выполнена";

$y_1^O$  — выходной сигнал, подтверждающий, что операция передана на выполнение;

$y_2^O$  — выходной сигнал, подтверждающий, что операция выполнена;

$f^O, h^O$  — функции переходов и выходов, задаваемые табл. 1.

Диаграмма переходов конечного автомата (3), как типового элемента модели выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию, показана на рис. 3.

Модель выполнения решаемой прикладной задачи, сформированная в виде древовидной иерархической сети конечных автоматов вида (3), позволяет обеспечить не только контроль последовательно-параллельной очередности следования технологических операций в соответствии с априорно установленным сценарием, но и выдачу текущих заданий по его реализации силами имеющихся агентов.

Проведение экспериментальных исследований по оценке эффективности развиваемого подхода к планированию целесообразных действий в составе многоагентной системы предполагает необходи-

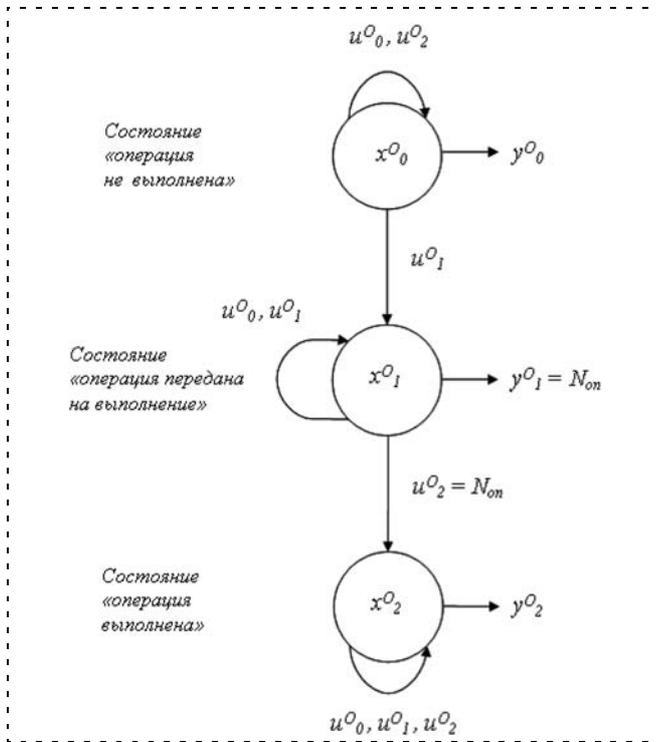


Рис. 3. Диаграмма переходов автомата, контролирующего выполнение операции в составе сценария решения поставленной прикладной задачи

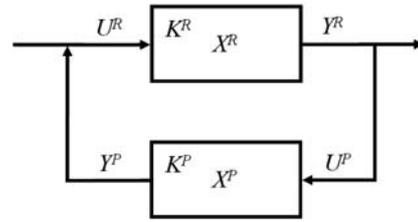


Рис. 4. Интегрированная модель процесса выполнения заданной технологической операции с помощью автономного робота

мость ее комплексного моделирования с эмуляцией процессов функционирования автономных роботов в ходе выполнения отдельных технологических операций. При этом смена состояний робота должна соответствовать замкнутому циклу "свободен — занят — свободен", продолжительность которого определяется от момента поступления команды на выполнение указанной операции до ее завершения.

С позиций теории автоматов обеспечение подобных свойств достигается формированием структуры с двумя замыкаемыми друг на друга элементами (рис. 4) — моделью робота и моделью собственно технологического процесса.

Таким образом, модель интеллектуального автономного робота как универсального агента, действующего в составе МАРС и способного обеспечить выполнение требуемых операций, также представляется автоматом вида (1):

$$K^R = \{U^R, X^R, Y^R, f^R, h^R\}, \quad (4)$$

где  $U^R = (u_0^R, u_1^R, \dots, u_m^R, u_q^R)$  — конечный входной алфавит;

$u_0^R$  — команда перехода в состояние исходной готовности;

$u_j^R$  ( $j = 1, \dots, m$ ) — команды на выполнение соответствующих технологических операций или подзадач;

$u_q^R$  — входной сигнал, имитирующий возникновение случайных воздействий фатального характера, приводящих к потере работоспособности робота;

$X^R = (x_0^R, x_1^R, \dots, x_m^R, x_q^R)$  — конечный алфавит состояний;

$x_0^R$  — состояние исходной готовности робота к выполнению новых технологических операций или подзадач;

$x_j^R$  ( $j = 1, \dots, m$ ) — множество состояний занятости выполнением соответствующих технологических операций или подзадач;

$x_q^R$  — состояние потери роботом своей работоспособности;

$Y^R = (y_0^R, y_1^R, \dots, y_m^R, y_q^R)$  — конечный выходной алфавит;

$y_0^R$  — выходной сигнал, подтверждающий готовность робота к выполнению новых технологических операций или подзадач;

$y_j^R$  ( $j = 1, \dots, m$ ) — множество выходных сигналов, подтверждающих занятость робота выполнением соответствующих технологических операций или подзадач;

$y_q^R$  — выходной сигнал, подтверждающий переход робота в неработоспособное состояние;

$f^R, h^R$  — функции переходов и выходов, задаваемые табл. 2.

Диаграмма переходов состояний модели автономного робота, представленного в виде конечного автомата (4), показана на рис. 5.

В свою очередь, модель собственно процесса выполнения технологической операции или подза-

дачи должна быть представлена конечным автоматом следующего вида:

$$K^P = \{U^P, X^P, Y^P, f^P, h^P\}, \quad (5)$$

где  $U^P = (u_0^P(t), u_j^P(t))$  — входной алфавит;

$u_j^P(t)$  — входной сигнал на запуск процесса выполнения соответствующей технологической операции или подзадачи;

$u_0^P(t)$  — входной сигнал на завершение процесса выполнения соответствующей технологической операции или подзадачи;

$X^P = (x_0^P(t), x_j^P(t))$  — алфавит состояний;

$x_0^P(t)$  — исходное состояние модели процесса выполнения соответствующей технологической операции или подзадачи;

$x_j^P(t)$  — состояние модели, соответствующее завершению процесса выполнения  $j$ -й технологической операции или подзадачи;

$Y^P = (y_0^P(t), y_j^P(t))$  — выходной алфавит;

$y_0^P(t)$  — выходной сигнал, подтверждающий нахождение модели процесса выполнения соответствующей технологической операции или подзадачи в исходном состоянии;

$y_j^P(t)$  — выходной сигнал, подтверждающий переход модели к состоянию, которое соответствует завершению процесса выполнения  $j$ -й технологической операции или подзадачи;

$f^P, h^P$  — функции переходов и выходов вида (2), задаваемые табл. 3 с учетом длительности выполнения  $\Delta t_j$  соответствующей технологической операции или подзадачи.

Диаграмма переходов состояний модели, описывающей процесс выполнения технологической операции или подзадачи и представленной в виде конечного автомата (5), показана на рис. 6.

Сформированная модель при  $\Delta t_j = 1$ , по существу, реализует функции стандартного элемента задержки. Та же самая модель при  $\Delta t_j = T$  может рассматриваться в качестве эквивалентного автомата,

Таблица 2

Входы	Состояния		
	$x_0^R$	$x_j^R$	$x_q^R$
$u_0^R$	$x_0^R$	$x_0^R$	$x_q^R$
$u_j^R$	$x_j^R$	$x_j^R$	$x_q^R$
$u_q^R$	$x_q^R$	$x_q^R$	$x_q^R$
Выходы	$y_0^R$	$y_j^R$	$y_q^R$

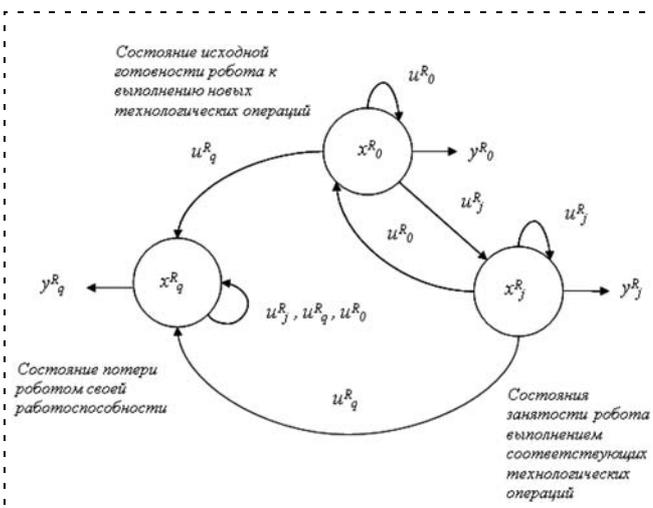


Рис. 5. Диаграмма переходов состояний модели автономного робота, представленного в виде конечного автомата

Таблица 3

Входы	Состояния	
	$x_0^P$	$x_j^P$
$u_0^P$	$x_0^P$	$x_0^P$
$u_j^P$	$x_j^P$	$x_j^P$
Выходы	$y_0^P$	$y_j^P$

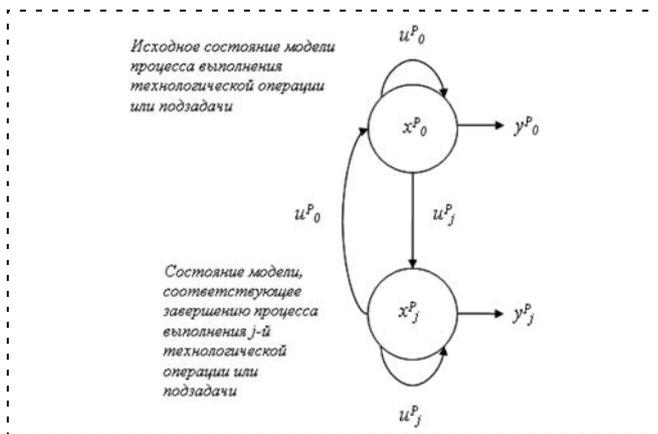


Рис. 6. Диаграмма переходов состояний модели, описывающей процесс выполнения технологической операции и представленной в виде конечного автомата

соответствующего последовательному объединению  $T$  стандартных элементов с единичной задержкой у каждого.

Следует отметить, что объединение автоматов (4) и (5) в единую структуру, представленную на рис. 4, позволяет моделировать смену состояний робота в процессе выполнения указанной технологической операции или подзадачи с учетом требуемых временных затрат. Подобная интеграция предполагает замыкание входа одного конечного автомата на выход другого, и наоборот, с отождествлением ряда параметров:

$$\begin{aligned} y_j^R &= u_j^P; \\ y_j^P &= u_0^R. \end{aligned} \quad (6)$$

Реализуемость, работоспособность и применимость предложенного подхода к планированию действий МАРС полностью подтверждается данными компьютерного моделирования.

В качестве примера на рис. 7 (см. третью сторону обложки) приведены результаты моделирования процессов планирования действий по построению правильной пирамиды из шести кубиков и распределения соответствующих операций по их выполнению тремя автономными роботами, входящими в состав мультиагентной системы.

В рамках проведения эксперимента продолжительность выполнения операций задавали случайным образом, а распределение заданий между агентами осуществлялось по принципу прямой очередности.

Важно отметить, что простота предложенных моделей допускает возможность реализации механизмов планирования действий по решению поставленной прикладной задачи в соответствии с априорно заданным сценарием в составе МАРС не только с централизованной, но и с распределенной архитектурой. В последнем случае принятие решений должно осуществляться каждым из агентов

индивидуально на основе анализа имеющейся у каждого и одинаковой для всех сценарной модели с учетом данных, поступающих по сетевым каналам информационного обмена.

#### **Методы и алгоритмы распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах.**

Функциональные возможности, работоспособность и эффективность мультиагентной системы, создаваемой для решения конкретных прикладных задач, во многом предопределяются организацией процедур распределения заданий между исполнителями с учетом имеющихся у них ресурсов. При этом специфика проблемной области по существу обуславливает выбор соответствующих методов и алгоритмов.

Так, например, один из наиболее активно развиваемых в теории мультиагентных систем подходов связан с использованием методов сетевых переговоров и компенсационных торгов [7, 8] для распределения финансовых, материальных и других ресурсов при решении задач логистики, формирования портфелей заказов и т. д.

Распределение заданий в мультиагентных робототехнических системах не только должно осуществляться исходя из условий обоснованного выбора исполнителей по критериям достаточности имеющихся, минимизации расходуемых или максимизации остающихся ресурсов, но и должно удовлетворять требованиям обеспечения реального времени.

Простейший способ распределения заданий может быть основан на формировании соответствующих назначений в зависимости от степени полезности (или пригодности) агентов для проведения тех или иных технологических операций.

В общем случае полезность или пригодность агента для проведения конкретной технологической операции определяется двумя ключевыми факторами — принципиальным наличием необходимых функциональных возможностей и объемом имеющихся ресурсов, что в формализованной форме представления приобретает следующий вид:

$$f = \left( \prod_{j=1}^J (1 - F_j) \right) R, \quad (7)$$

где  $F_j$  — логическая переменная, характеризующая наличие или отсутствие у агента необходимой функциональной возможности для выполнения рассматриваемой технологической операции и принимающая значение соответственно 0 или 1;  $R$  — количественная оценка полезности агента с позиций имеющихся (или остающихся) у него ресурсов для (или после) выполнения рассматриваемой технологической операции.

Так, например, необходимый набор функциональных характеристик агента, выполняющего операцию транспортировки некоторого технологического объекта, должен как минимум включать возможность манипулирования грузами опреде-

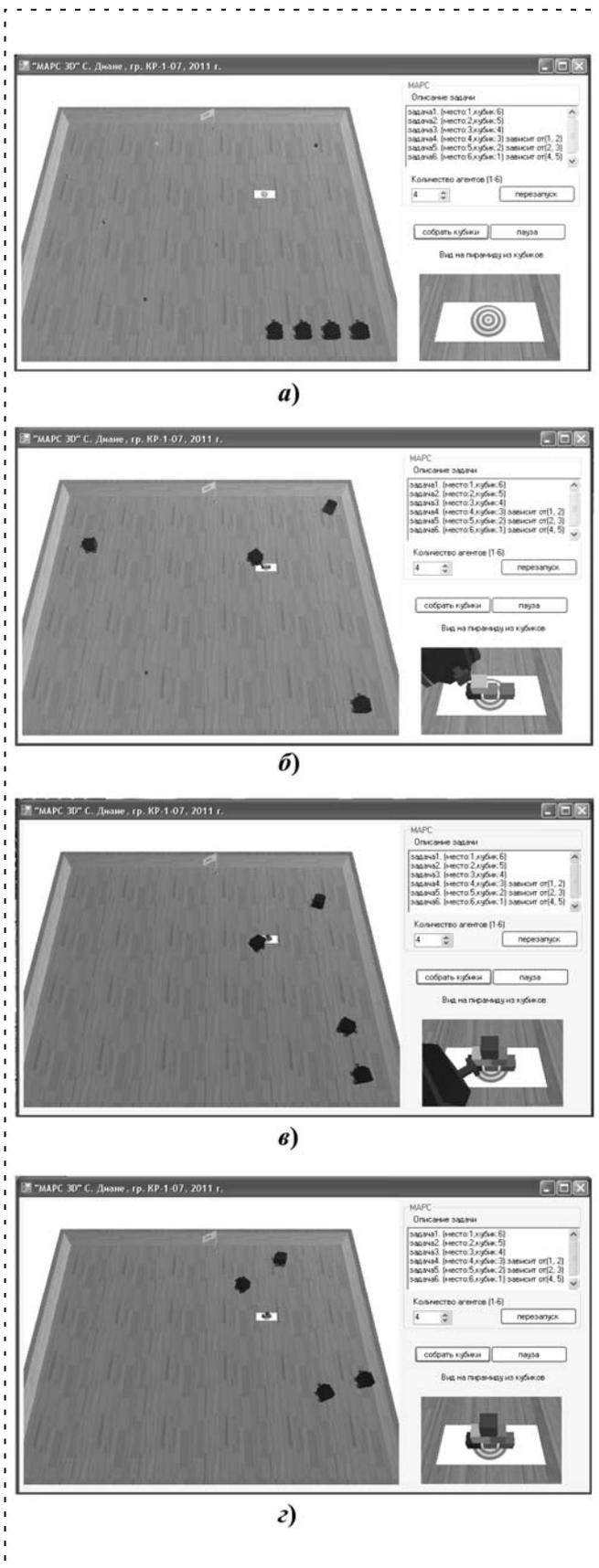


Рис. 8. Моделирование процессов планирования действий и распределения заданий в составе MAPCS при решении задачи сборки кубиков в пирамиду: исходное состояние (а); выполнение заданий по установке кубиков (б, в); перемещение роботов к месту сбора после выполнения поставленной задачи (г)

ленной массы и целенаправленного перемещения на требуемые расстояния в среде соответствующего типа с присущим ей рельефом, условиями проходимости и т. д.

Следует отметить, что реальные возможности агента обуславливаются не только его конструктивными особенностями, но и совокупным ресурсом, как в ситуации с перемещением на заданное расстояние, когда прохождение предполагаемого маршрута находится в прямой зависимости от адекватного запаса топлива (или уровня заряда аккумуляторных батарей), надежности ходовой части и пр.

В свою очередь, количественная оценка полезности агента, формируемая в качестве обобщенного критерия обоснованного выбора среди прочих равных исполнителей наиболее подходящего для рассматриваемой технологической операции по запасу имеющихся ресурсов, может быть представлена в аддитивной (или мультипликативной) форме [9, 10]:

$$R = \sum_{i=1}^I c_i r_i, \quad (8)$$

где  $c_i$  — весовой коэффициент, характеризующий значимость соответствующего вида ресурса в составе обобщенной оценки;  $r_i$  — количественная оценка запаса соответствующего вида ресурса, имеющегося в распоряжении агента.

При этом под ресурсом понимается количественная характеристика некоторого свойства или состояния системы, которое является одной из составляющих обеспечения ее работоспособности или целесообразности применения.

Подобная трактовка позволяет использовать выражения (7), (8) для оценки полезности агентов с учетом всей совокупности прагматически важных факторов, включая не только такие, как близость к месту проведения конкретной операции, но и текущие значения параметров собственного состояния.

Экспериментальные исследования на практике подтвердили эффективность применения алгоритмов оценки полезности исполнителей для решения задачи распределения заданий в составе MAPCS, комплексное моделирование которой проводилось с использованием средств трехмерной графики *MOGRE* и физической библиотеки *Nvidia PhysX*.

На рис. 8 представлены фрагменты моделирования тестовой задачи по сборке кубиков в пирамиду группой автономных роботов в составе многоагентной системы, построенной на основе применения развиваемых подходов к планированию целесообразных действий и распределению заданий.

Следует отметить, что предложенные модели и алгоритмы позволяют обеспечить функционирование системы в реальном масштабе времени и могут быть положены в основу соответствующих программных средств для бортовых систем управления автономных агентов.

**Заключение.** Очевидно, что функциональные возможности и эффективность применения создаваемых образцов МАРС будут во многом обуславливаться выбранными принципами их построения.

В этом смысле программно-алгоритмические средства, обеспечивающие планирование действий и распределение заданий по выполнению поставленной прикладной задачи группой роботов, играют особую роль. Выбор соответствующего математического аппарата фактически предопределяет не только работоспособность системы, но и класс и способ постановки решаемых задач, накладывая свои требования на разработку человеко-машинного интерфейса.

Предложенные модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в составе МАРС на практике доказали свою результативность, проверенную в ходе широкой серии модельных экспериментов.

В то же время универсальность представлений, используемых в рамках развиваемого подхода при формировании сценарной модели решаемой прикладной задачи, а также при оценке полезности агентов на тех или иных этапах ее выполнения, открывает вполне понятные перспективы по созданию

средств человеко-машинного интерфейса, удобного для оператора МАРС.

#### Список литературы

1. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. М.: Янус-К, 2002.
2. **Каляев И. А.** Метод коллективного управления группой объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 3.
3. **Каляев И. А., Капустян С. Г.** Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6.
4. **Зенкевич С. Л.** Принципы построения систем управления роботов // Робототехнические системы и автоматическое управление: Межвуз. сб. научн. тр. М.: МИРЭА, 1985.
5. **Зенкевич С. Л., Клевалин А. В.** Программирование сборочных адаптивных роботов // Управление в гибких производственных системах и робототехнических комплексах: Межвуз. сб. научн. тр. М.: МИРЭА, 1988.
6. **Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М.** Дискретная математика для инженера. М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. **Тарасов В. Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдуториал УРСС, 2002.
8. **Ивкускин К. В., Минаков И. А., Ржевский Г. А., Скобелев П. О.** Мультиагентная система для решения задач логистики. URL: [http://www.adalius.ru/web\\_logistic\\_details.php?id=41](http://www.adalius.ru/web_logistic_details.php?id=41)
9. **Кини Р. Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.
10. **Мамиконов А. Г.** Принятие решений и информация. М.: Наука, 1983.

УДК 629.1.03

**А. В. Малолетов**, канд. техн. наук, докторант,

**Е. С. Брискин**, д-р физ.-мат. наук, проф.,

**А. М. Колесов**, аспирант,

dtm@vstu.ru,

Волгоградский государственный  
технический университет

## О походках реконфигурируемой модульной шагающей машины с ортогонально-поворотными двигателями<sup>1</sup>

*Рассматриваются шагающие машины модульной структуры, допускающие реконфигурацию кинематической схемы. Описываются типы походок, характерные для машин с двигателями, объединяющими в себе два или более механизма шагания. Для разработанной шагающей машины "Ортоног" решаются задачи определения необходимого числа и типа приводных модулей, позволяющих осуществлять произвольное программное движение корпуса, определения допустимых походок и ограничений на движение корпуса при исключении некоторых приводных модулей.*

**Ключевые слова:** шагающая машина, модульная структура, реконфигурация, походка, шагающий двигатель, управление движением

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-08-00955-а.

## Введение

Рассматриваются шагающие машины модульной структуры (рис. 1, а), допускающие реконфигурацию кинематической схемы. В частности, разработанная в Волгоградском государственном техническом университете совместно с ЦКБ "Титан" машина "Ортоног" (рис. 2, см. третью сторону обложки) состоит из рамы и четырех модулей сдвоенных ортогонально-поворотных движителей. Модули движителей, в свою очередь, включают в себя модуль поворотного привода и два модуля механизмов шагания, каждый из которых собирается из двух модулей линейных приводов: курсового перемещения и привода адаптации (см. рис. 1, б). Всего сдвоенный ортогонально-поворотный движитель содержит пять модулей приводов, и его можно условно разделить на две ноги, считая, что привод поворота является общим для обеих ног. Шагающая машина "Ортоног", таким образом, имеет 20 управляемых степеней свободы.

Модульный принцип построения шагающей машины не только позволяет наращивать ее возможности, собирая из однотипных модулей транспортные агрегаты необходимой грузоподъемности [1], но и предполагает возможность реконфигурации аппарата во время движения путем отключения или включения некоторых приводов (механизмов

шагания, движителей) и блокировки соответствующих степеней свободы. При этом следует учитывать, что конструкция используемых приводов такова, что в выключенном или нерабочем состоянии привод блокирует соответствующую степень свободы.

Изучаются кинематически точные [2, 3] режимы движения при выполнении необходимых условий статической устойчивости с различной модульной реконфигурацией базовой шагающей машины "Ортоног".

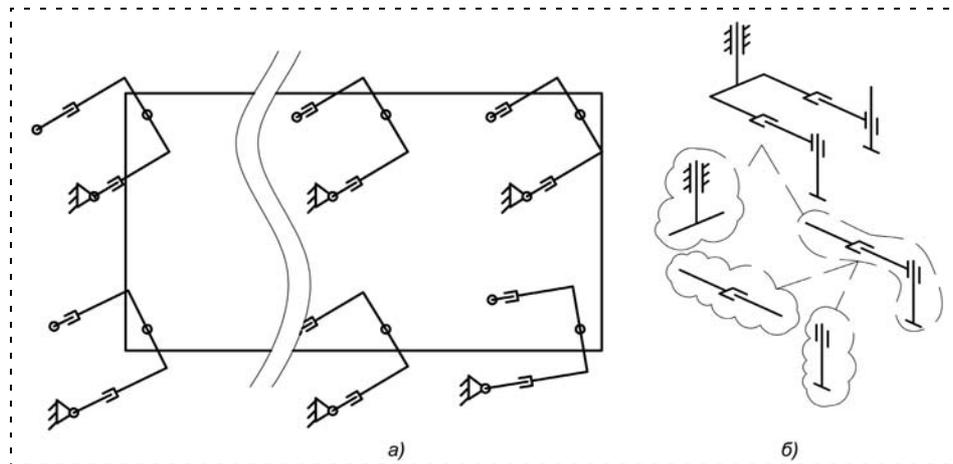


Рис. 1. Кинематическая схема модульной шагающей машины: а — вид сверху, на каждом движителе один из механизмов шагания условно показан находящимся в опоре на грунт; б — схема ортогонально-поворотного шагающего движителя

### 1. Типы походок

В соответствии с работой [4] под походкой понимается последовательность фаз опоры и переноса отдельных ног (механизмов шагания). Такое определение допускает использование термина "походка" как для машины в целом, так и для отдельных движителей, состоящих из двух или более механизмов шагания [5]. Поскольку программное движение корпуса может быть достаточно сложным, рассматриваемые далее походки попадают в класс свободных походок [4], которые допускают произвольное изменение порядка и продолжительности фаз опоры и переноса в зависимости от особенностей опорной поверхности и требуемого движения корпуса. Для рассматриваемой машины можно выделить три типа свободных походок: полноопорные, неполноопорные и смешанные походки.

**Полноопорные походки** — это походки, обеспечивающие отсутствие в работе каждого движителя фазы переноса одновременно всех механизмов шагания, входящих в движитель. Полноопорные походки могут быть реализованы движителями, состоящими из двух или более механизмов шагания, и машинами, построенными на основе таких движителей.

**Неполноопорные походки** — это походки, обеспечивающие чередование в работе каждого движителя фазы опоры хотя бы на один из механизмов шагания и фазы переноса всех механизмов шагания, входящих в движитель. Такого типа походки реализуются, например, в машинах, каждый движитель которых представляет собой один независимый механизм шагания.

**Смешанные походки** — это походки, обеспечивающие отсутствие в работе некоторых движителей фазы одновременного переноса всех механизмов шагания и наличие в работе других движителей чередования фазы опоры на один или несколько механизмов шагания и фазы переноса всех механизмов шагания, входящих в движитель.

В рассматриваемой машине полноопорная походка с использованием четырех движителей гарантированно обеспечивает нахождение геометрического центра корпуса, с которым приблизительно совпадает центр масс, в пределах опорного многоугольника при любом геометрически реализуемом движении корпуса. Поэтому в базовой конфигурации машины, включающей в себя все 20 приводных модулей, использование полноопорных походок является предпочтительным.

Однако кинематическая схема машины "Ортоног" позволяет осуществить пространственное программное движение корпуса и при использовании только части имеющихся приводов. Например, можно организовать полноопорную походку с опорой на три движителя, используя только 15 приводов.

Для организации неполноопорных походок достаточно использовать четыре механизма шагания, принадлежащие разным движителям и имеющие в сумме 12 управляемых приводов. Требование статической устойчивости означает, что машина должна опираться на три механизма шагания, в то время как четвертый находится в переносе. В частном случае, при прямолинейном программном движении центра корпуса, этот режим соответствует последовательной походке [4].

Возможны режимы движения, при которых будет задействовано более 12 и менее 20 приводов и будет обеспечено пространственное движение корпуса. А если допустить некоторые ограничения на движение корпуса, то движение машины возможно и при меньшем числе управляемых степеней свободы. При этом могут быть реализованы походки смешанного типа.

Хотя практическая реализация движения с использованием меньшего числа механизмов шагания представляет определенные сложности, связанные с необходимостью контролировать положение центра масс машины относительно опорного много-

Число кинематических схем машины для различного числа приводов

Виды походок	Число работоспособных приводов										
	≤10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Всего схем	616 666	167 960	125 970	77 520	38 760	15 504	4845	1140	190	20	1
Возможна полноопорная походка	0	0	0	0	0	4	20	40	40	20	1
Возможна неполноопорная походка	0	0	16	128	416	704	664	352	104	16	1
Возможны оба типа	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	1
Возможна полноопорная походка с ограничением	0	0	0	0	24	124	260	280	136	20	1
Возможна неполноопорная походка с ограничением	0	64	496	1568	2608	2480	1408	504	116	16	1
Возможны оба типа с ограничением	0	0	0	0	0	0	48	128	92	16	1

угольника [6], такие режимы движения являются вполне допустимыми.

Таким образом, для организации программного движения корпуса имеющиеся 20 управляемых степеней свободы избыточны. Использование меньшего числа приводов позволяет эксплуатировать машину и в тех ситуациях, когда использование всех приводов нежелательно или невозможно, например, при выходе некоторых приводов из строя, при невозможности опирания на один из механизмов шагания из-за особенностей опорной поверхности и в других ситуациях.

Система управления реконфигурируемой шагающей машины должна автоматически решать задачи:

- определения необходимого числа и типа приводных модулей, позволяющих осуществлять произвольное программное движение корпуса машины;
- определения допустимых походок и ограничений на движение корпуса машины, связанных с исключением некоторых приводных модулей.

## 2. Описание кинематических схем

Отключение или выход из строя очередного привода фактически приводит к появлению новой кинематической схемы, которая отличается от предыдущей тем, что имеет на одну управляемую степень свободы меньше.

Число возможных конфигураций машины при исключении из работы нескольких приводов определяется числом сочетаний из  $n$  по  $k$ :

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (1)$$

где  $n = 20$  — общее число приводов,  $k$  — число работающих приводов.

Так, при неработающем (отсутствующем) одном приводе возможны 20 различных кинематических схем в зависимости от того, какой из приводов был отключен. Конечно, многие из этих схем будут симметричны друг другу, что позволяет рассматривать только некоторые из них, проводя анализ вручную.

Однако при отключении двух приводов число вариантов кинематических схем возрастает до 190, и даже задача определения симметричных вариантов становится достаточно сложной. Еще больше трудоемкость решения возрастает при трех и более неработающих приводах.

В первой строке табл. 1 показано распределение числа возможных кинематических схем для различного числа отключенных приводов. Общее число различных комбинаций равно  $2^{20} = 1\,048\,576$ . Хотя значительная часть конфигураций не представляет практического интереса, так как в них используется заведомо мало приводов, число конфигураций, требующих анализа, очень велико.

Для анализа кинематических схем предлагается следующая система обозначений. Работающий привод обозначается символом "1", неработающий привод — символом "0". Конкретная кинематическая схема машины описывается 20 символами, сгруппированными в движители — в четыре группы по пять символов в каждой. Порядок следования движителей не важен в решаемой задаче и не оговаривается. Однако этот порядок не меняется при переходе от одной кинематической схемы к другой.

Порядок следования приводов в пределах движителя: поворотный, левый курсового перемещения, левый адаптации, правый курсового перемещения, правый адаптации. Следует отметить, что понятия

Таблица 2

Примеры обозначения кинематических схем движителей и машины

Обозначение	Описание
10000	Движитель, у которого работоспособен только поворотный привод
11100	Движитель, у которого работоспособны приводы: поворотный, левый курсового перемещения, левый адаптации
01010	Движитель, у которого работоспособны только приводы курсового перемещения
00000 00000 00000 00000	Машина, у которой отключены все приводы
11111 11111 11111 11111	Машина, у которой все приводы работоспособны

"левый" и "правый" в рассматриваемом случае являются условными, используются только для определенности и могут быть заменены любыми другими обозначениями.

Несколько примеров обозначений приведено в табл. 2.

Введенная система обозначений позволяет перебрать на ЭВМ все конфигурации машины от "00000 00000 00000 00000" до "11111 11111 11111 11111", проверяя каждую из них на допустимость того или иного типа походки.

### 3. Операции и операторы

Для работы с комбинациями, записанными в виде последовательностей нулей и единиц, требуется проводить ряд логических операций.

В данной работе логическое значение ИСТИНА считается эквивалентным числовому значению 1, а логическое ЛОЖЬ — числовому 0. В частности, это означает, что для них определена операция арифметического сложения, которая обозначается символом +.

Операция логического сложения (дизъюнкция) обозначается символом  $\vee$ , а операция логического умножения (конъюнкция) — символом  $\wedge$ .

Символом  $\leftrightarrow$  обозначается оператор проверки эквивалентности.

Бинарный оператор *shr* осуществляет побитовый сдвиг вправо. Применяется к первому аргументу, сдвиг осуществляется на число позиций, заданное вторым аргументом.

Для получения состояния определенного привода или нескольких приводов используется операция маскирования: конъюнкция строки, описывающей конфигурацию машины, и битовой маски — строки, в которой требуемые приводы выставлены в 1, а все остальные — в 0. Вводится оператор *m*, осуществляющий маскирование с последующим сравнением результата с маской:

$$m(X, M) = (X \wedge M) \leftrightarrow M, \quad (2)$$

где *X* — комбинация, к которой применяется оператор; *M* — битовая маска.

Через *s(X)* обозначается оператор, который возвращает число битов, имеющих значение 1 в комбинации *X*.

### 4. Условия осуществимости различных видов движений

#### 4.1. Условия осуществимости управляемого пространственного движения корпуса

Необходимым условием сохранения статической устойчивости машины является нахождение в опоре не менее трех ног. При этом корпус машины может осуществлять произвольное пространственное движение только в том случае, если в каждой

из опорных ног будут работоспособны все три привода. Этот вывод может быть получен, например, из подсчета степеней свободы рассматриваемой механической системы. Так, машина с тремя ногами представляет собой систему 10 твердых тел, общее число степеней свободы которой равно 60. На нее наложены ограничения: по три связи на каждую ногу со стороны опорной поверхности и по пять связей на каждый из девяти приводов. Разница между числом степеней свободы и числом наложенных ограничений равна шести, что и является числом управляемых степеней свободы, которые имеет корпус.

Для реализации полноопорной походки на смену находящимся в опоре трем ногам нужно поставить другие три ноги, принадлежащие тем же движителям, причем эти ноги тоже должны иметь по три степени свободы. Таким образом, полноопорная походка требует наличия не менее трех полностью работающих движителей — движителей, у которых работоспособны все пять приводов.

Оператор  $f_D$ , возвращающий значение ИСТИНА, если комбинация *X* допускает организацию полноопорной походки, и ЛОЖЬ в обратном случае, может быть реализован следующим образом:

$$f_D(X) = [m(X, 11111\ 00000\ 00000\ 00000) + m(X, 00000\ 11111\ 00000\ 00000) + m(X, 00000\ 00000\ 11111\ 00000) + m(X, 00000\ 00000\ 00000\ 11111)] \geq 3. \quad (3)$$

Здесь каждый из операторов *m* осуществляет проверку работоспособности всех пяти приводов в соответствующем движителе, а результаты выполнения операторов интерпретируются как числа 0 или 1, что позволяет найти их сумму и сравнить ее с требуемым числом движителей.

Если при каждом перешагивании удастся поставить на грунт ногу, принадлежащую движителю, обе ноги которого до этого находятся в переносе, то возможна реализация неполноопорной походки.

Для осуществления такой походки необходимо, чтобы на каждом движителе были работоспособны не менее трех приводов, образующих ногу (поворотный привод и либо оба левых привода, либо оба правых).

Оператор  $f_Q$ , возвращающий значение ИСТИНА, если комбинация *X* допускает организацию неполноопорной походки, и ЛОЖЬ — в обратном случае, может быть реализован следующим образом:

$$f_Q(X) = [m(X, 11100\ 00000\ 00000\ 00000) \vee m(X, 10011\ 00000\ 00000\ 00000)] \wedge [m(X, 00000\ 11100\ 00000\ 00000) \vee m(X, 00000\ 10011\ 00000\ 00000)] \wedge [m(X, 00000\ 00000\ 11100\ 00000) \vee m(X, 00000\ 00000\ 10011\ 00000)] \wedge [m(X, 00000\ 00000\ 00000\ 11100) \vee m(X, 00000\ 00000\ 00000\ 10011)]. \quad (4)$$

Здесь каждый оператор  $m$  осуществляет проверку работоспособности в движителе трех приводов, образующих ногу. Операторы дизъюнкции проверяют наличие в движителях хотя бы одной такой ноги, а операторы конъюнкции проверяют наличие такой ноги в каждом движителе.

Применение операторов (3), (4) к множеству возможных комбинаций приводов позволяет отфильтровать 2501 комбинацию, для которых реализуема хотя бы одна из рассматриваемых походок. Из них для 125 комбинаций реализуема полноопорная походка, для 2401 комбинации — неполноопорная походка, а для 25 комбинаций — оба типа походок. Для большинства из этих комбинаций возможен также смешанный тип походки. Распределение числа кинематических схем в зависимости от числа используемых приводов для различных типов походок показано в табл. 1.

#### 4.2. Условия осуществимости управляемого "плоско-параллельного" движения корпуса

Среди возможных ограничений на движение корпуса машины наибольший интерес с практической точки зрения вызывает такое движение корпуса, при котором произвольно задаются только перемещение центра корпуса в плане опорной поверхности и угол рыскания корпуса. Углы крена и тангажа задаются равными нулю или допускается незначительное их отклонение от нуля. Высота центра корпуса над опорной поверхностью не задается. При движении по достаточно ровной опорной поверхности можно считать, что задается плоско-параллельное программное движение корпуса.

В этом случае допустимо использовать для опоры одну ногу, имеющую заблокированный привод адаптации, при условии, что приводы остальных ног обеспечивают адаптацию "дефектной" ноги к грунту.

В общем случае недопустимо использовать для опоры более одной ноги с заблокированным приводом адаптации. Это возможно в маловероятной ситуации, когда два или три привода адаптации будут заблокированы в одинаковых положениях или возможно при блокировке приводов в различных положениях, если допускаются значительные углы крена и тангажа.

Проверка реализуемости "плоскопараллельного" программного движения корпуса основывается на условиях, подобных (3), (4). Но теперь допускается отсутствие одного из шести используемых приводов адаптации в случае полноопорной походки или одного из четырех используемых приводов адаптации — в случае неполноопорной походки.

Для реализации полноопорной походки должны выполняться условия:

1) имеется не менее двух полностью работоспособных движителей (со всеми пятью приводами);

2) имеется еще хотя бы один движитель, у которого работоспособны все приводы, возможно, кроме одного из приводов адаптации.

Оператор для проверки этих условий может быть записан в виде:

$$f_{DI}(X) = \{[m(X, 11111\ 00000\ 00000\ 00000) + m(X, 00000\ 11111\ 00000\ 00000) + m(X, 00000\ 00000\ 11111\ 00000) + m(X, 00000\ 00000\ 00000\ 11111)] \geq 2\} \wedge \{[m(X, 11010\ 00000\ 00000\ 00000) \wedge (s(X \wedge 00101\ 00000\ 00000\ 00000) > 0)] + \{m(X, 00000\ 11010\ 00000\ 00000) \wedge (s(X \wedge 00000\ 00101\ 00000\ 00000) > 0)\} + \{m(X, 00000\ 00000\ 11010\ 00000) \wedge (s(X \wedge 00000\ 00000\ 00101\ 00000) > 0)\} + \{m(X, 00000\ 00000\ 00000\ 11010) \wedge (s(X \wedge 00000\ 00000\ 00000\ 00101) > 0)\}] \geq 3\}. \quad (5)$$

Здесь сначала определяется наличие не менее двух движителей с пятью приводами в каждом, аналогично выражению (3). Затем для каждого движителя с помощью оператора  $s$  определяется число работоспособных приводов адаптации, которых должно быть больше нуля. С помощью оператора  $m$  определяется наличие поворотного и обоих приводов курсового перемещения. С помощью оператора дизъюнкции, таким образом, проверяется условие, что движитель имеет поворотный привод, оба привода курсового перемещения и хотя бы один привод адаптации. Результаты работы операторов конъюнкции интерпретируются как числа 0 или 1 и складываются для всех движителей.

Для реализации неполноопорной походки должны выполняться условия:

1) работают все четыре поворотных привода;

2) на каждом движителе работает хотя бы один привод курсового перемещения;

3) имеются хотя бы три работающих привода адаптации, принадлежащие трем разным движителям и находящиеся на ногах с работающими приводами курсового перемещения.

Оператор для проверки этих условий может быть записан в виде:

$$g_1(X) = X \wedge 01010\ 00000\ 00000\ 00000,$$

$$g_2(X) = X \wedge 00000\ 01010\ 00000\ 00000,$$

$$g_3(X) = X \wedge 00000\ 00000\ 01010\ 00000,$$

$$g_4(X) = X \wedge 00000\ 00000\ 00000\ 01010,$$

$$f_{QV}(X) = m(X, 10000\ 10000\ 10000\ 10000) \wedge (s(g_1(X)) > 0) \wedge (s(g_2(X)) > 0) \wedge (s(g_3(X)) > 0) \wedge (s(g_4(X)) > 0) \wedge \{[(s(X \wedge (g_1(X) \vee ((g_1(X)shr1))) > s(g_1(X))) + (s(X \wedge (g_2(X) \vee ((g_2(X)shr1))) > s(g_2(X))) + (s(X \wedge (g_3(X) \vee ((g_3(X)shr1))) > s(g_3(X))) + (s(X \wedge (g_4(X) \vee ((g_4(X)shr1))) > s(g_4(X))))] \geq 3\}. \quad (6)$$

Здесь сначала определяются вспомогательные операторы  $g_1(X)$ ,  $g_2(X)$ ,  $g_3(X)$ ,  $g_4(X)$ , которые обеспечивают конъюнкцию  $X$  и битовых масок, соответствующих работоспособным приводам курсового перемещения на соответствующем движителе. Затем определяется основной оператор, в котором можно выделить три структурные части. В первой части проверяется соответствие маске, описывающей работоспособность четырех поворотных движителей. Во второй части для каждого движителя подсчитывается число работоспособных приводов курсового перемещения и проверяется, что это число больше нуля. В третьей части в квадратных скобках подсчитывается сумма однотипных слагаемых, каждое из которых может быть равно 1 или 0 (ИСТИНА или ЛОЖЬ) в зависимости от того, имеется ли в соответствующем движителе нога с работоспособными приводом курсового перемещения и приводом адаптации. В каждом из этих слагаемых сначала результат применения соответствующего оператора  $g_i(X)$  сдвигается вправо, определяя таким образом битовую маску для приводов адаптации, зависящую от работоспособности приводов курсового перемещения, затем с помощью оператора побитовой дизъюнкции образуется общая для привода курсового перемещения и привода адаптации маска, которая, в свою очередь, применяется к исходной комбинации. В полученном результате подсчитывается общее число работоспособных приводов в соответствующем движителе и сравнивается с числом работоспособных приводов курсового перемещения в этом же движителе. Если существует хотя бы один привод адаптации, удовлетворяющий условиям, то результат сравнения будет ИСТИНА, что для последующей операции арифметического сложения трактуется как 1. Условие в фигурных скобках удовлетворяется, если обнаруживаются не менее трех подходящих приводов адаптации.

Применение операторов (5, 6) к множеству возможных комбинаций приводов позволяет отфильтровать 9821 комбинацию, для которых реализуема хотя бы одна из рассматриваемых походок. Из них для 797 комбинаций реализуема сдвоенная походка, для 9261 комбинации — квадронодная походка, а для 237 комбинаций — оба типа походок. Распределение числа кинематических схем в зависимости от числа используемых приводов для различных типов походок показано в табл. 1.

## Заключение

Модульный принцип построения шагающей машины предполагает реконфигурацию ее кинематической схемы в том числе и во время движения, что делает актуальным вопрос о допустимых походках и возможных ограничениях, накладываемых на движение корпуса при добавлении или исключении отдельных модулей.

Описанные в работе типы свободных походок: полноопорная и неполноопорная, имеют важное значение для организации управляемого движения шагающих машин с движителями, объединяющими два или более механизмов шагания.

Предложен метод описания кинематической схемы реконфигурируемой модульной шагающей машины, основанный на представлении конфигурации машины в виде двоичного числа и позволяющий осуществлять анализ работоспособности аппарата с помощью методов двоичной алгебры.

Сформулированы условия реализации полноопорной и неполноопорной походок для случаев пространственного и плоскопараллельного программных движений корпуса машины. Записаны математические операторы, позволяющие осуществлять проверку рассмотренных условий.

Полученные операторы могут быть использованы в системе управления разработанной шагающей машины «Ортоног» для проверки допустимости алгоритмов движения, реализующих ту или иную походку, в случае изменения конфигурации машины.

## Список литературы

1. **Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.** Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза // Искусственный интеллект. 2007. № 4. С. 408.
2. **Брискин Е. С.** Об общей динамике и повороте шагающих машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 6. С. 33–39.
3. **Briskin E. S., Chernyshev V. V., Maloletov A. V., Zhoga V. V.** The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis Cycle Mechanisms of Walking // 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, Changchun University of Science and Technology, Kagawa University. Changchun, 2009. P. 3631–3636.
4. **Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф.** Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.
5. **Брискин Е. С.** Об управлении походкой шагающей машины "Восьминог" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 5. С. 55.
6. **Брискин Е. С., Колесов А. М., Малолетов А. В., Серов В. А.** Об определении предельно допустимых нагрузок, действующих на ортогонально-поворотные движители // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2010. № 9. С. 19–23.

УДК 62-52:621.9.06

**В. М. Иванов**, канд. техн. наук, доц.,  
v.ivanov@ulstu.ru,  
Ульяновский государственный  
технический университет

## Идентификация параметров и алгоритмы самонастройки в системах стабилизации усилия резания

*Дано математическое описание процесса резания как звена с переменными параметрами, основные особенности которого связаны с определением переходных режимов и параметров управления через реальные координаты системы управления и адаптивную модель. Рассмотрены принципы реализации самонастраивающихся систем предельного регулирования. Приведены результаты моделирования систем регулирования усилия резания, включая системы ЧПУ со следящим электроприводом. Даны рекомендации по распределению задач управления и алгоритмического обеспечения систем ЧПУ.*

**Ключевые слова:** станкостроение, мехатронные системы, процесс резания, адаптивная модель, самонастраивающиеся системы регулирования, числовое программное управление (ЧПУ)

### Введение

Современные тенденции развития станкостроения связаны с разработкой многофункциональных мехатронных модулей со встроенным силовым электрооборудованием, системами контроля и диагностики. Концепция модульного построения предусматривает развитие мультипроцессорных и многоядерных систем ЧПУ, обеспечивающих широкие возможности по оптимизации режимов резания.

Известен ряд систем стабилизации силовых параметров, в которых оптимизация режимов обработки достигается за счет изменения скорости резания, скорости подачи, геометрии резания и их комбинаций. Несмотря на очевидные преимущества, связанные с повышением производительности и точности обработки, системы стабилизации силовых параметров не нашли широкого распространения в станках с ЧПУ. Это можно объяснить, с одной стороны, тем, что методология систем ЧПУ основана на жестком программном управлении, а с другой стороны, — недостаточным уровнем детализации математического описания объекта уп-

равления (процесса резания) и проработанности адаптивных алгоритмов управления.

Наиболее известны статические модели процесса резания, базирующиеся на эмпирических зависимостях [1]. Данные модели в основном отражают прогноз поведения инструмента в зависимости от условий обработки. В основе расчета регулируемых параметров и формирования целевых функций управления в этом случае используют заданный период стойкости инструмента.

В работах [2, 3] процесс резания представлен как динамический объект с запаздыванием и рассмотрены различные аппроксимации данного объекта в виде фиксирующего звена, апериодического звена первого или второго порядка. Однако механизм стружкообразования в моделях подобного типа выпадает из рассмотрения и не учитывает изменение постоянных времени объекта в широких пределах.

Таким образом, реализация подсистем стабилизации силовых параметров, представляющих собой нижний уровень систем оптимального управления, требует более детального описания процесса резания в части его динамических свойств. Кроме того, необходим учет нестационарных условий обработки как совокупности взаимозависимых процессов.

### Процесс резания как нестационарный объект управления

Процесс резания определяется как кинематической схемой резания, так и условиями снятия срезаемого слоя, обусловленными упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, трением, тепловыми явлениями, физико-химическими и другими факторами. Большинство из этих факторов непосредственно не могут быть определены, а их действие оценивается косвенными величинами: усилиями резания, моментами нагрузки, мощностью на валу двигателя. При этом наиболее достоверная информация о процессе резания и состоянии режущего инструмента может быть получена на основании измерения составляющих усилия резания. В процессе снятия стружки к режущей кромке резца на токарном станке прикладывается усилие  $F$ , которое можно контролировать по трем составляющим:

$$F = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2},$$

где  $F_z$  — главная сила, преодолеваемая шпинделем станка и действующая по касательной к поверхности резания;  $F_x$  — осевая сила, действующая в направлении продольной подачи;  $F_y$  — радиальная сила, действующая по нормали к обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим процесс формообразования детали на токарном станке, выделив при этом величины, влияющие на стабилизацию основного параметра, в качестве которого примем усилие резания. В процессе обработки текущее значение силы резания при продольном тчении согласно [4] равно

$$F_i(t) = a_x(t)a_y(t)H_w(t)C_i(t) = a_x(t)k_i(t), \quad (1)$$

где  $k_i(t)$  — обобщенный коэффициент передачи, являющийся функцией изменения следующих параметров резания во времени:  $a_y(t)$  — глубины резания,  $H_w(t)$  — твердости материала заготовки,  $C_i(t)$  — геометрии резания, степени затупления инструмента и неучтенных условий обработки ( $i$  — индекс координаты  $x, y, z$ );  $a_x(t)$  — толщины стружки.

При этом объект, включающий измерительную цепь датчика силового параметра, может быть описан в виде следующей передаточной функции:

$$W''(p, t) = \frac{U_f(p, t)}{a_x(p)} = \frac{k_x(t)k_f}{T_f p + 1}, \quad (2)$$

где  $U_f(p, t)$ ,  $k_f$ ,  $T_f$  — выходной сигнал, коэффициент и постоянная времени датчика усилия резания.

Один из методов оптимизации системы в условиях неполной априорной информации основан на введении в контур управления модели. Различают эталонную и адаптивную модели, используемые в самонастраивающихся системах [5, 6, 7]. Параметры эталонной модели выбирают из условия обеспечения желаемой передаточной функции объекта, а адаптивную модель подстраивают под характеристики объекта. И в том, и в другом случае информация об ошибке рассогласования между выходом модели и объекта используется для компенсации параметрических возмущений путем соответствующей настройки регуляторов в основном контуре системы.

В настоящее время отсутствуют достаточно четкие рекомендации по использованию того или иного типа модели в системах стабилизации параметров резания (ССПР), что вызвано достаточно сложными процессами, происходящими в контурах самонастройки, даже в простейших случаях.

В целях выявления возможностей реализации самонастраивающихся СПР и их функционирования сопоставим алгоритмы настройки для данных типов моделей. Пусть объект в соответствии с (1) и (2) описывается уравнением первого порядка

$$\dot{y} + ay = k(t)g,$$

где  $k(t) = k_f k_x(t)/T_f$ ;  $a = 1/T_f$ .

Примем в качестве эталонной модели стационарное звено. Тогда с учетом контура настройки системы и эталонную модель можно описать уравнениями вида

$$\begin{aligned} \dot{y} + ay &= k(t)k_{\text{CH}}(t)g; \\ \dot{y}_M + by_M &= k_M g, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k(t)$  — переменный во времени коэффициент объекта;  $k_{\text{CH}}(t)$  — коэффициент самонастройки;  $k_M$  — коэффициент модели;  $g, y, y_M$  — входной и выходные сигналы системы и модели;  $a = b$ .

На основании (3) запишем уравнение для ошибки рассогласования между выходом системы и модели:

$$\dot{\varepsilon} + b\varepsilon = \gamma g, \quad (4)$$

где

$$\varepsilon^{(i)} = y_M^{(i)} - y^{(i)}; \gamma = k_M - k_{\text{CH}}(t)k(t).$$

Задачу синтеза регулятора будем решать с помощью прямого метода Ляпунова. Для этого введем функцию Ляпунова в виде квадратичной формы фазовых координат и коэффициентов усиления

$$V = b\varepsilon^2 + \lambda\gamma^2, \quad (5)$$

где  $\lambda$  — положительная величина.

Найдем полную производную для функции Ляпунова

$$\frac{dV}{dt} = 2b\varepsilon\dot{\varepsilon} + 2\lambda\dot{\gamma}\gamma. \quad (6)$$

Определяя из (4) производную от ошибки  $\dot{\varepsilon} = \gamma g - b\varepsilon$  и подставляя ее в формулу (6), получим

$$\frac{dV}{dt} = -2b^2\varepsilon^2 + 2b\gamma\varepsilon g + 2\lambda\dot{\gamma}\gamma.$$

В силу определения устойчивости по Ляпунову для достижения устойчивого процесса настройки производная по времени должна иметь знак, противоположный  $V$ , т. е. для затухания всех отклонений  $\varepsilon^{(i)}$  в переходном процессе необходимо выполнение условия

$$\begin{aligned} 2b\gamma\varepsilon g + 2\lambda\dot{\gamma}\gamma &\leq 0 \\ \text{или } \dot{\gamma} &\leq -\frac{b}{\lambda}\varepsilon g. \end{aligned} \quad (7)$$

Предположим, что коэффициент  $k(t)$  изменяется квазистационарно, тогда на интервалах самонастройки  $[t_i, t_i + T_i]$

$$\dot{\gamma} = -\dot{k}_{\text{CH}}(t)k(T_i). \quad (8)$$

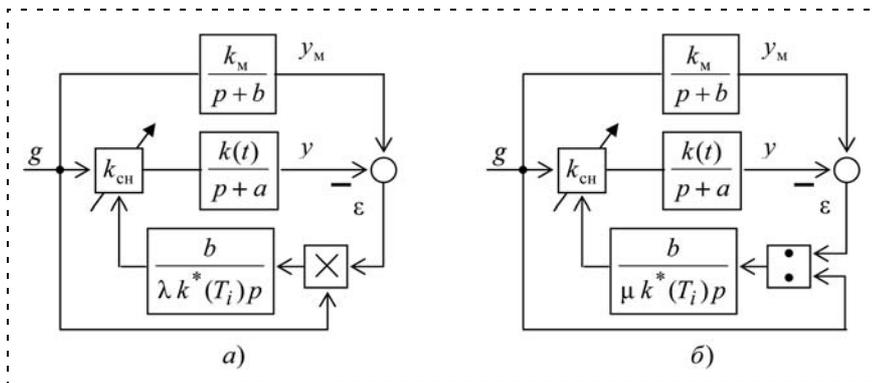


Рис. 1. Структурные схемы контуров самонастройки с эталонной моделью

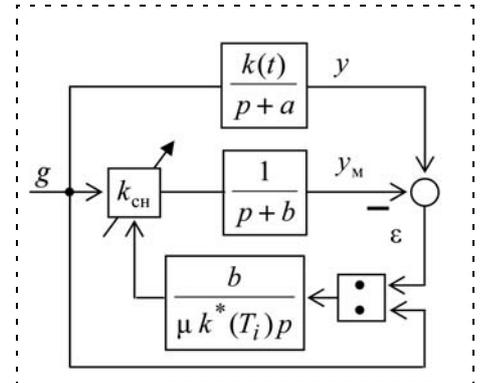


Рис. 2. Структурная схема контура самонастройки с адаптивной моделью

На основании (7) и (8) получим уравнение, характеризующее закон изменения настраиваемого параметра,

$$\dot{k}_{\text{CH}}(t) \geq \frac{b}{\lambda k^*(T_i)} \varepsilon g, \quad (9)$$

где  $k^*(T_i)$  — одно из значений  $k(T_i)$ .

Если в качестве исполнительного устройства, перестраивающего коэффициент  $k_{\text{CH}}$ , выбрать интегрирующее устройство, то структурная схема контура самонастройки с эталонной моделью для объекта первого порядка будет соответствовать структуре, показанной на рис. 1, а.

Запишем уравнение для контура настройки:

$$k_{\text{CH}} = \varepsilon g \frac{b}{\lambda k^*(T_i) p} = g^2 \frac{b(k_M - k_{\text{CH}} k(T_i))}{\lambda k^*(T_i) p(p+a)}. \quad (10)$$

Пусть изменение  $k(t)$  произошло к моменту времени, когда переходные процессы от входного воздействия  $g$  закончены, тогда уравнение (10) можно записать следующим образом:

$$\ddot{k}_{\text{CH}} + a \dot{k}_{\text{CH}} + g^2 \frac{b k(T_i)}{\lambda k^*(T_i)} k_{\text{CH}} = g^2 \frac{b k_M}{\lambda k^*(T_i)}, \quad (11)$$

где  $g$  входит в уравнение как параметр.

Анализ уравнения (11) показывает, что характер переходных процессов зависит от интенсивности управляющего воздействия. Так как на коэффициенты функции Ляпунова не накладывается никаких ограничений, кроме их положительности, то выберем  $\lambda$  в виде квадратичной формы от входного воздействия:

$$\lambda = \mu g^2, \quad \mu > 0. \quad (12)$$

Тогда уравнение (9) будет иметь вид

$$\dot{k}_{\text{CH}} \geq \frac{b \varepsilon}{\mu k^*(T_i) g}. \quad (13)$$

Уравнение контура настройки (рис. 1, б) с учетом (13) можно записать в виде

$$k_{\text{CH}} = \frac{b(k_M - k_{\text{CH}} k(T_i))}{\mu k^*(T_i) p(p+a)}$$

или в дифференциальной форме

$$\ddot{k}_{\text{CH}} + a \dot{k}_{\text{CH}} + \frac{b k(T_i)}{\mu k^*(T_i)} k_{\text{CH}} = \frac{b k_M}{\mu k^*(T_i)}.$$

Отсюда следует, что настройка параметров выполняется независимо от характера входного воздействия, однако остается зависимость качества переходного процесса от изменения  $k(t)$ , так как его значения  $k(T_i)$  не подлежат определению.

Рассмотрим идентификационный подход, позволяющий определить характеристики объекта по подстраиваемой модели (рис. 2).

Уравнение для ошибки рассогласования между объектом и моделью в этом случае будет иметь вид

$$\dot{\varepsilon} + b \varepsilon = \gamma g, \quad (14)$$

где  $\gamma = k(t) - k_{\text{CH}}(t)$ ,  $\varepsilon = y - y_M$ .

Используя уравнения (6) и (14), можно получить следующее условие асимптотической устойчивости процессов в контуре самонастройки:

$$\dot{\gamma} \leq -\frac{b}{\lambda} \varepsilon g,$$

что позволяет с учетом (12) определить алгоритм настройки в следующем виде:

$$\ddot{k}_{\text{CH}} \geq \frac{b}{\mu} \frac{\varepsilon}{g}.$$

Уравнение контура настройки системы с подстраиваемой моделью можно записать в виде

$$\ddot{k}_{\text{CH}} + a \dot{k}_{\text{CH}} + \frac{b}{\mu} k_{\text{CH}} = k(T_i). \quad (15)$$

Из (15) следует, что характер переходного процесса в контуре настройки не зависит от входного воздействия и изменения  $k(t)$ . Таким образом,

оценка параметров объекта в случае использования адаптивной модели однозначна. Необходимо также отметить, что при синтезе реальной системы с эталонной моделью порядок системы управления не меньше двух. При этом для обеспечения асимптотической устойчивости процессов самонастройки необходимо вводить идеальные дифференцирующие звенья соответствующих порядков. Это затрудняет реализацию контуров самонастройки и обеспечивает дополнительные преимущества самонастраивающихся систем с адаптивной моделью.

### Самонастраивающаяся система стабилизации силы резания

Структурная схема системы стабилизации силы резания на токарном станке при продольном точении показана на рис. 3. Система реализована в соответствии с принципами подчиненного регулирования параметров [8]. Электропривод подачи содержит контуры регулирования тока и скорости. Используя общепринятые допущения, выберем в качестве регуляторов тока и скорости ПИ-регуляторы с передаточными функциями:

$$W_{pi}(p) = \frac{R_3(T_3 p + 1)}{k_\mu k_i 2 T_\mu p};$$

$$W_{pc}(p) = \frac{k_i J (8 T_\mu p + 1)}{32 T_\mu^2 k_\omega c \Phi p}.$$

При этом контур тока будет настроен на модульный оптимум, а контур скорости — на симметричный оптимум.

Пренебрегая производными высшего порядка, передаточную функцию привода подачи можно записать в следующем виде:

$$W'_{\omega_x}(p) = \frac{(8 T_\mu p + 1) / K_{\omega_x}}{32 T_\mu^2 p^2 + 8 T_\mu p + 1}, \quad (16)$$

где  $K_{\omega_x}$  — коэффициент передачи датчика скорости,  $T_\mu$  — постоянная времени вентильного преобразователя.

Для исключения перерегулирования на входе устанавливают фильтр с передаточной функцией

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{8 T_\mu p + 1}. \quad (17)$$

С учетом (17) передаточная функция контура скорости по управляющему воздействию будет иметь вид

$$W_{\omega_x}(p) = \frac{1/k_{\omega_x}}{32 T_\mu^2 p^2 + 8 T_\mu p + 1}. \quad (18)$$

При переходе к контуру стабилизации силового параметра необходимо учитывать специфические свойства процесса резания как нестационарного объекта, параметры которого могут изменяться в десятки и сотни раз [2]. Традиционные методы

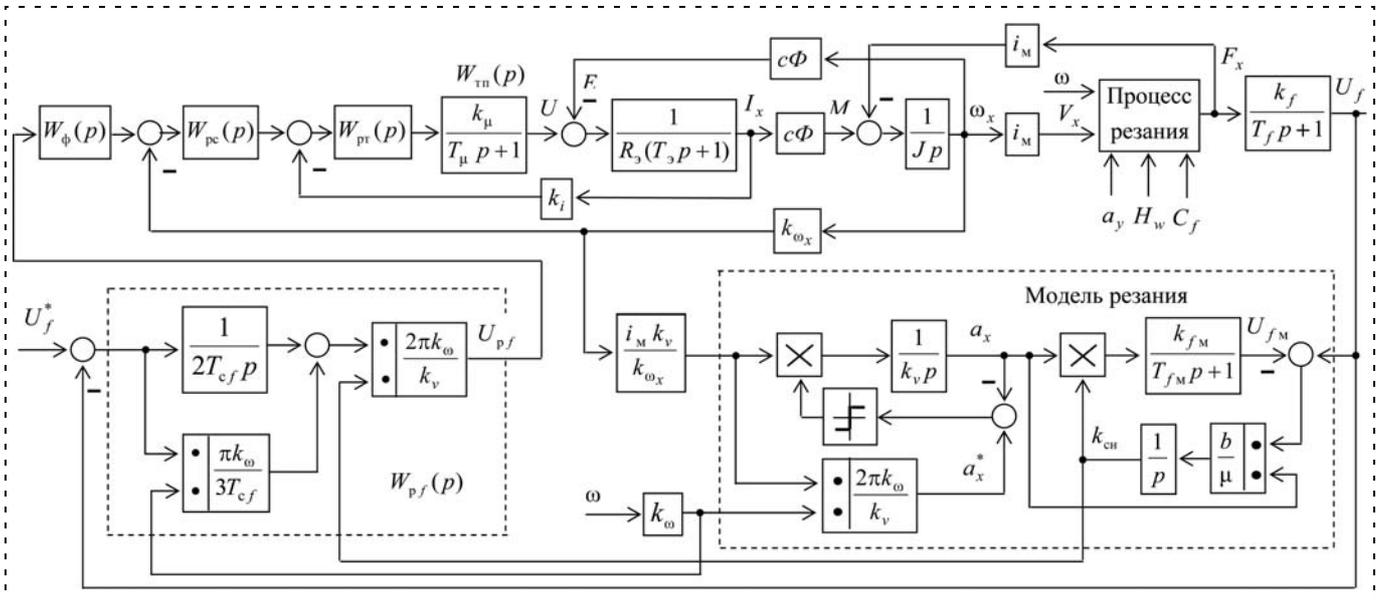


Рис. 3. Структурная схема системы стабилизации силы резания на токарном станке при продольном точении:  $W_{tr}(p)$ ,  $W_{pc}(p)$ ,  $W_{pi}(p)$  — передаточные функции регуляторов тока, скорости и усилия резания;  $W_{tr}(p)$  — передаточная функция тиристорного преобразователя;  $k_\mu$ ,  $T_\mu$  — коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя;  $k_i$ ,  $k_{\omega_x}$ ,  $k_v$  — коэффициенты передачи датчиков тока, частоты вращения и скорости подачи;  $R_3$ ,  $T_3$  — эквивалентное сопротивление якорной цепи и электромагнитная постоянная времени двигателя;  $c$ ,  $\Phi$  — конструктивная постоянная и поток двигателя;  $J$  — приведенный момент инерции;  $I_x$ ,  $M$ ,  $U$ ,  $E$  — ток, момент, напряжение на якоре и ЭДС двигателя;  $i_m$  — коэффициент механизма передачи между двигателем и суппортом;  $k_{fm}$ ,  $T_{fm}$  — коэффициент и постоянная времени модели датчика усилия резания;  $k_\omega$  — коэффициент передачи датчика частоты вращения шпинделя

коррекции решения задач устойчивости и обеспечения заданного быстродействия в указанных системах не эффективны. В рассматриваемой системе [9] определение параметров и решение задач самонастройки осуществляется с помощью модели процесса резания.

Рассмотренная структура адаптивной модели тождественна обыкновенному следящему контуру, в котором введение делителя позволяет устранить влияние параметра  $a_x$  на динамику контура самонастройки. Контур при выборе  $b/\mu = 1/K_{fm} \cdot 2T_{fm}$  настроен на модульный (технический) оптимум, что соответствует коэффициенту демпфирования  $\xi = \sqrt{2}/2$  для звена второго порядка.

Заметим, что при разработке контура самонастройки использованы свойства коммутативности параметрических звеньев и представление их переменными коэффициентами, осуществляемое путем замены блоков умножения и деления эквивалентными коэффициентами.

Доопределим модель резания (рис. 3). Для этого целесообразно исследовать процесс врезания и изменения режимов резания за счет угловой скорости вращения заготовки  $\omega$  и скорости подачи  $v$  инструмента.

Переходные процессы, вызванные изменением режимов резания, приводят к изменению толщины стружки. Данное изменение при нулевых начальных условиях можно записать следующим образом:

$$a_i = \begin{cases} \int_0^T v_i(t) dt & \text{при } 0 < t < T; \\ 0 & \\ a_i^* & \text{при } t \geq T, \end{cases} \quad (19)$$

где  $a_i^* = 2\pi v_i/\omega$  — подача инструмента или иначе установившееся значение толщины стружки;  $v_i$  — скорость подачи;  $\omega$  — скорость вращения шпинделя станка;  $i = x, y$  — координата продольной или поперечной подачи.

Если ввести функцию переключения режима резания через текущие значения координат, то изменение толщины стружки можно представить в виде нелинейного дифференциального уравнения

$$\frac{da_i}{dt} = v_i \text{sign}(a_i^* - a_i). \quad (20)$$

Детализация описания позволяет определить промежуточный параметр  $a_x^*$  непосредственно через значения текущих координат. При этом величина  $a_x^*$ , пропорциональная установившемуся значению толщины стружки, формируется на выходе блока деления, а ее текущая толщина  $a_x$  — на выходе нелинейного интегратора модели процесса врезания.

Процесс врезания (19), (20) может быть аппроксимирован нестационарным звеном первого или второго порядка (рис. 4).

Для упрощения аппроксимация свойств нелинейного интегратора, включающего в себя пороговый элемент и интегратор, осуществляется нестационарным апериодическим звеном

$$W'(p, t) = \frac{a_x(p, t)}{v(p)} = \frac{1}{T_1(t)p + 1}, \quad (21)$$

где  $T_1(t) = T(t)/3$  — выбирается из условия вхождения в 5 %-ную зону установившегося значения нелинейного интегратора;  $T(t) = 2\pi/\omega(t)$  — постоянная времени процесса резания, равная времени одного оборота шпинделя.

Для основного контура процесс резания с учетом (2) может быть представлен нестационарным апериодическим звеном

$$W_o(p, t) = \frac{F_x(p, t)}{v(p)} = \frac{k_x(t)}{T_1(t)p + 1}. \quad (22)$$

Структура регулятора силового параметра выбирается из условия настройки системы на модульный оптимум в соответствии с принципами подчиненного регулирования параметров. Коррекция системы осуществляется с помощью пропорционально-интегрального регулятора с переменными параметрами

$$W_f(p, t) = \frac{k_{\omega_x}(T_1(t)p + 1)}{k_{ch}(t)i_m k_f 2T_{cf}p} = \left( \frac{T(t)}{6T_{cf}} + \frac{1}{2T_{cf}p} \right) \frac{k_{\omega_x}}{k_{ch}(t)i_m k_f}, \quad (23)$$

где  $T_{cf} = 8T_\mu + T_f$  — сумма малых постоянных времени контура стабилизации силового параметра;  $i_m$  — коэффициент механизма передачи.

Постоянная времени  $T(t) = 2\pi/\omega$  процесса резания, равная времени одного оборота шпинделя, характеризует время выхода интегратора на установившееся значение при скачкообразном изменении частоты вращения шпинделя или скорости подачи. Данная постоянная в процессе обработки может

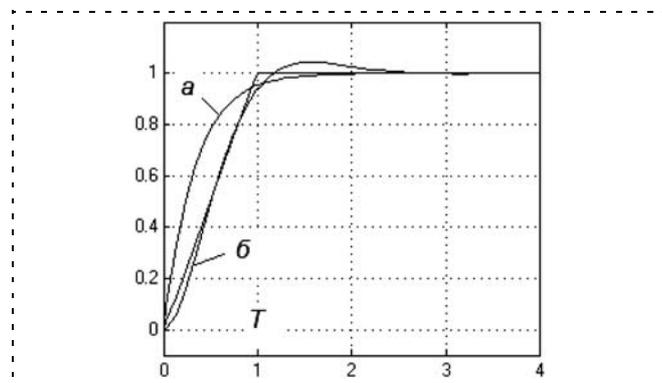


Рис. 4. Аппроксимация нелинейного интегратора: а — звеном первого порядка; б — колебательным звеном

изменяться в десятки раз. Для ее компенсации регулятор содержит цепь, образованную интегратором, делителем и сумматором, соответствующую пропорционально-интегральному звену. Коэффициент

$\frac{k_{\omega_x}}{k_{сн}(t)i_M k_f}$ , воздействующий на пропорциональную и интегральную составляющие регулятора, реализуется с помощью дополнительного блока деления, причем пропорциональная составляющая регулятора с учетом коэффициента передачи  $k_{\omega}$

датчика частоты вращения шпинделя должна быть

$$k_{пр} = \frac{\pi k_{\omega}}{3 T_{сф} U_{\omega}(t)},$$

где  $U_{\omega}(t) = k_{\omega} \omega(t)$  — выходной сигнал датчика скорости привода главного движения.

### Результаты моделирования

Исследование рассмотренных принципов реализации системы стабилизации усилия резания проводилось с учетом реальных свойств и ограничений двухконтурного привода подачи. В качестве регуляторов использовались ПИ-регуляторы тока и скорости. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Диаграмма движения содержит четыре участка: пуск привода без нагрузки, врезание, переход на увеличенную глубину резания и изменения параметров обработки. Переход на работу внешнего контура осуществлялся в момент врезания, путем коммутации выхода регулятора силового параметра к входу регулятора скорости. Работа регулятора силового параметра в целях исключения перерегулирования блокировалась до момента врезания.

Известно, что подача в меньшей степени зависит от глубины резания и в диапазоне определенных допусков может быть принята величиной постоянной. При этом наиболее эффективна организация системы управления, основанная на формировании

сигналов обратных связей, приведенных к единице режущей поверхности. Наиболее просто данное приведение реализуется путем формирования сигнала задания в функции глубины резания. Работа в этом случае осуществляется с соответствующим увеличением сигнала обратной связи (рис. 5). Необходимым условием реализации данного режима является измерение текущего припуска на обработку или программируемое задание глубины резания.

Увеличение усилия резания за счет, например, изменения твердости заготовки или затупления ин-

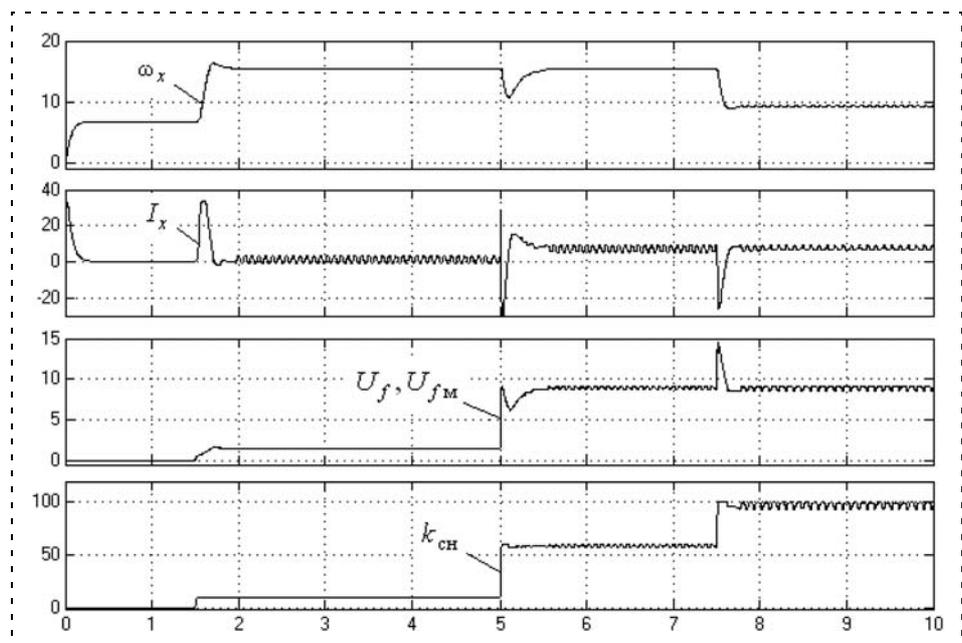


Рис. 5. Переходные процессы на участках пуска, врезания, изменения глубины резания и параметров обработки

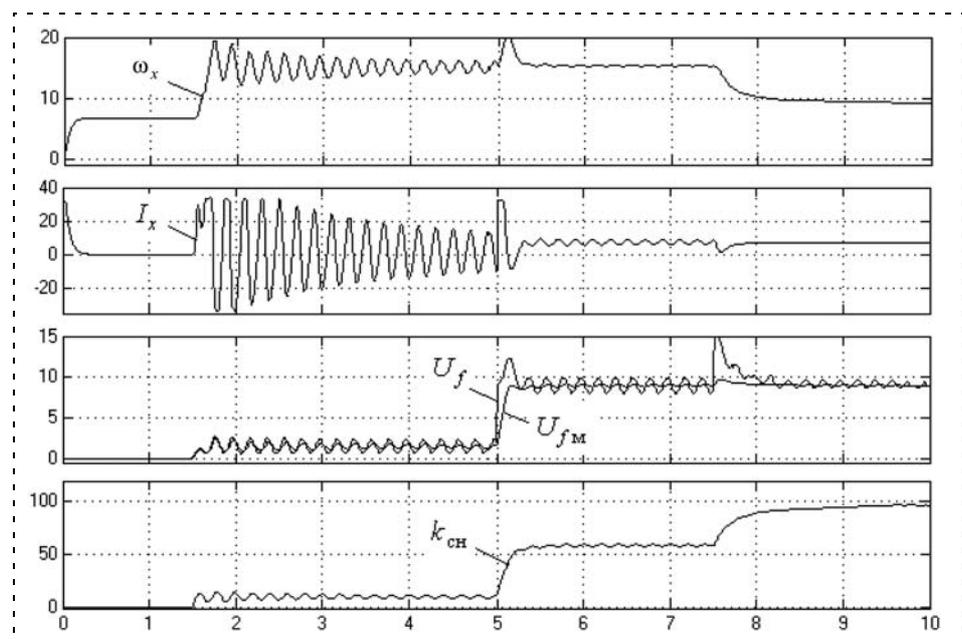


Рис. 6. Переходные процессы при эксцентриситете заготовки и введения блока демпфирования колебаний



передаточной функции скоростного контура (18), то при обработке управляющего воздействия будет выполнено очевидное условие  $\nabla X = 0$ . Контур положения в этом случае можно рассматривать как вспомогательный, за счет которого в установившемся режиме обеспечивается астатизм по скорости. При настройке контура положения на модульный оптимум в качестве регулятора положения принято пропорциональное звено

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{k_{\omega_x}}{i_M k_{\text{п}} 2 T_{\text{сх}}}, \quad (24)$$

где  $k_{\text{п}}$  — коэффициент передачи преобразователя перемещения в код;  $T_{\text{сх}} = 8T_{\text{ц}}$  — суммарная малая постоянная контура положения.

Постоянная времени интегратора  $T_{\text{и}}$  определяет темп приращения частоты  $\omega_x^*$  и настраивается из условия обеспечения заданного рассогласования по положению.

Настройки регулятора силового параметра (23) практически остаются без изменения и требуют учета только дополнительной составляющей постоянной времени задатчика интенсивности  $T_{\text{сф}} = T_{\text{сф}} + T_{\text{ф}} + T_{\text{и}}/3$ . Результаты моделирования структуры ЧПУ с адаптивным управлением показаны на рис. 8, откуда видно, что переходные процессы практически совпадают с полученными ранее результатами. Таким образом, рассмотренный вариант комбинированного следящего привода с фильтром в цепи задающей координаты не приводит к снижению быстродействия привода подачи и его качественных показателей.

### Заключение

Таким образом, совместное использование реальных координат и адаптивной модели позволяет осуществить идентификацию параметров, компенсировать влияние нестационарных условий обработки, устранить условия возникновения автоколебаний и обеспечить технически оптимальные процессы в широком диапазоне изменения параметров резания.

Рассмотренные принципы построения адаптивной модели и регулятора силовых параметров не исчерпывают всех возможных вариантов реализации и могут быть дополнены звеньями, учитывающими технологические ограничения, геометрические

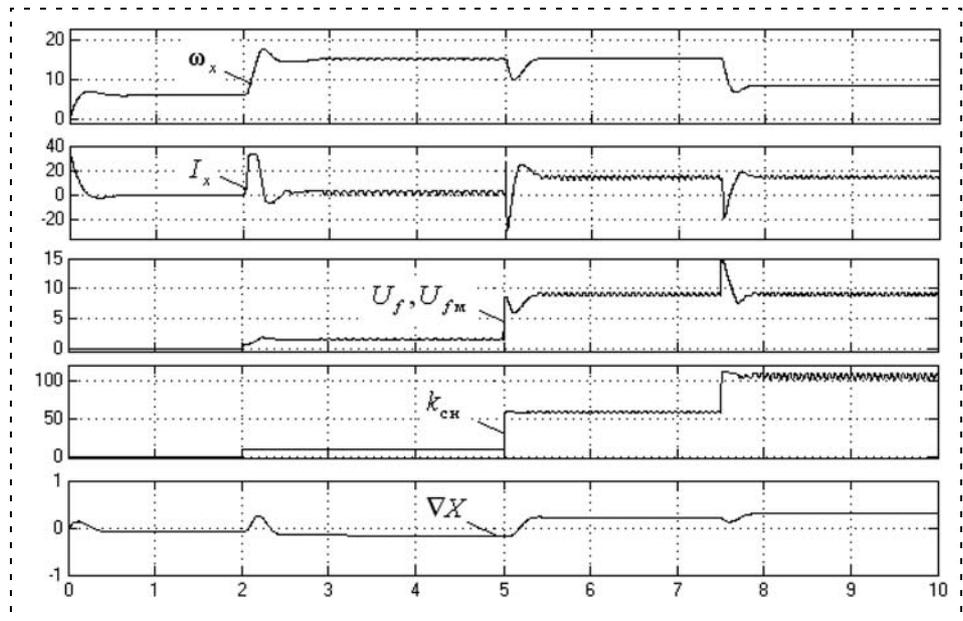


Рис. 8. Переходные процессы системы ЧПУ с адаптивным управлением

параметры инструмента и упругие свойства системы станок—приспособление—инструмент—деталь.

Алгоритмы идентификации параметров резания на основе предлагаемой модели кроме решения задач самонастройки режимов резания позволяют в стационарных условиях обработки проводить оценку состояния режущей кромки инструмента. Последнее имеет особое значение для своевременной замены инструмента на станках с ЧПУ.

В распределенных системах ЧПУ решение задач адаптивного управления целесообразно решать за счет специализированного интерфейса. При этом на базе микроконтроллера (МК) целесообразно совместить обработку входной информации, реализацию адаптивной модели и регулятора. В этом случае функции процессора ЧПУ практически остаются без изменения, а алгоритмическое обеспечение должно быть дополнено формированием задания усилия резания на МК и вводом информации с регулятора силового параметра для коррекции скорости подачи, обрабатываемой интерполятором.

В набор функций управляющей программы необходимо ввести черновой и чистовой режим. На первом проходе цикловой обработки для измерения глубины резания наиболее эффективно использование измерительного шупа. На последующих проходах задание усилия резания целесообразно формировать программным способом в функции приращения координаты. При обработке по двум координатам одну из них, по которой проводится контроль усилия резания, необходимо принять ведущей и выполнять по ней пересчет скорости ведомой для обеспечения заданного соотношения скоростей подач.

## Список литературы

1. **Справочник** по обработке металлов резанием / Ф. И. Абрамов и др. Киев: Техніка, 1983, 239 с.
2. **Корьгин А. М., Петров Н. К., Радимов С. Н., Шапарев Н. К.** Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 432 с.
3. **Абакумов А. М., Видманов Ю. И., Михелькевич В. Н.** Алгоритмизация процесса продольного точения // Станки и инструмент. 1975. № 2. С. 1—3.
4. **Глушко В. В., Шумов В. А.** Автоматическое регулирование режимов резания на двухопорных токарных станках // Станки и инструмент. 1973. № 6. С. 8—9.
5. **Солодовников В. В., Шрамко Л. С.** Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. М.: Машиностроение, 1972. 270 с.
6. **Громыко Б. Д., Санковский Е. А.** Самонастраивающиеся системы с моделью. М.: Энергия, 1974. 80 с.
7. **Куропаткин П. В.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш. школа, 1980. 287 с.
8. **Рудаков В. В., Мартикайнен Р. П.** Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. Л.: Энергия, 1972. 120 с.
9. **Патент РФ № 2058573, кл. G 05, В 13/02.** Устройство для управления металлорежущим станком / В. М. Иванов. БИ, 1996. № 11.

УДК 621.9.06-233.1-762

**А. П. Кушнир**, канд. техн. наук, доц.,  
gurinmura@yandex.ru,

Московский государственный университет  
приборостроения и информатики

## Исследование динамических процессов в уплотнительных устройствах мехатронных шпиндельных узлов

*Рассматриваются вопросы герметичности мехатронных шпиндельных узлов, впервые описан механизм потери герметичности при высоких угловых скоростях вращения шпинделя. Приведены результаты моделирования процессов потери герметичности. Полученные выводы актуальны для электрошпинделей, внутришлифовальных головок и других высокоскоростных узлов, работающих в условиях загрязненной атмосферы.*

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, герметичность, электрошпиндель, высокоскоростной узел, бесконтактное уплотнение, моделирование

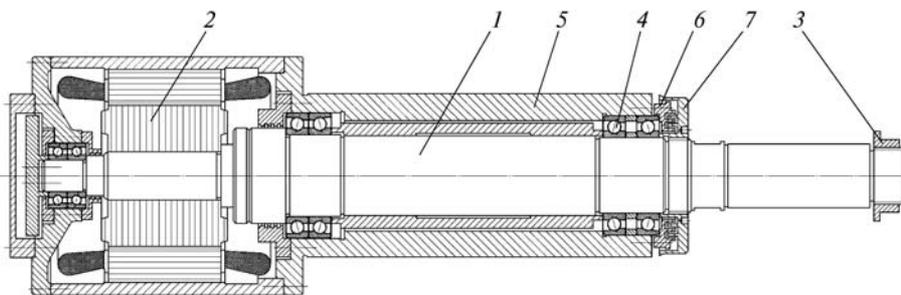
К современным шпиндельным узлам металлорежущих станков с ЧПУ предъявляются все более высокие требования по технологическим возможностям и эксплуатационным характеристикам. Шпиндельные узлы должны обеспечивать высокую точность вращения, жесткость, виброустойчивость, нагрузочную способность, быстроходность, долго-

вечность, низкие потери на трение. К сожалению, эти требования, как правило, противоречат друг другу. Повышение скоростей резания, например, вызывает необходимость применения более высоких частот вращения шпинделя, что приводит к увеличению потерь мощности на трение, росту динамических нагрузок, повышенному нагреву и снижению долговечности опор шпинделя, что негативно сказывается на надежности работы всего станка в целом [1, 2]. Наиболее остро эта проблема проявляется для внутришлифовальных головок, электрошпинделей, алмазно-расточных головок и других высокоскоростных шпиндельных узлов, частоты вращения которых составляют несколько десятков тысяч оборотов в минуту.

На рис. 1 представлен один из вариантов исполнения электрошпинделя, который состоит из установленного на подшипниках шпинделя 1, мотора 2 и системы зажима инструмента 3. Узел может быть выполнен как по трехопорной (как показано на рис. 1), так и двухопорной схемам. В последнем случае мотор располагается сразу за передней опорой 4.

Дополнительно современные электрошпиндели оснащаются датчиками и исполнительными элементами для контроля процесса высокоскоростной обработки. Мотор интегрирован в корпус 5 электрошпинделя и обеспечивает возможность работы при высоких частотах вращения. Для смазки подшипников применяют пластичную смазку (на весь срок службы) или используют масляный туман (воздушно-капельную смазку).

Высокоскоростные шпиндельные узлы предназначены для финишных операций и работают в условиях сильной абразивной загрязненности околостаночной зоны. Кроме того, условия эксплуатации



**Рис. 1. Электрошпиндель шлифовального станка фирмы Карр & Со (Coburg, Германия):** 1 — подшипники шпинделя; 2 — мотор; 3 — система зажима инструмента; 4 — передняя опора; 5 — корпус; 6, 7 — втулки

данных шпиндельных узлов существенно усложняются наличием большого количества смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зоне резания [3, 4]. Подшипники, работающие при высоких скоростях, в высшей степени чувствительны к внешним загрязнениям. Попадание стружки, пыли, СОЖ и других внешних материалов в область подшипников может вызвать повреждение и даже их отказ. Это особенно касается подшипников с пластичной смазкой [4].

Для защиты опор высокоскоростных шпинделей обычно применяют бесконтактные лабиринтные уплотнения, состоящие из двух втулок 6 и 7 (рис. 1), установленных соответственно в корпусе 5 и на шпинделе 1 с небольшими радиальными и осевыми зазорами между ними. Известно, что бесконтактные уплотнения обладают достаточно низкой герметичностью по сравнению, например, с уплотнениями контактного типа (манжетными, торцовыми и др.). Вместе с тем, высокие потери мощности и относительно низкие допустимые скорости не позволяют использовать контактные уплотнения в высокоскоростных узлах. Поэтому для повышения герметичности бесконтактных лабиринтных уплотнений в электрошпинделях дополнительно используют подачу сжатого воздуха внутрь шпиндельного узла под избыточным давлением. Поток этого воздуха выходит наружу в носовой и задней частях электрошпинделя, что затрудняет попадание загрязнений внутрь узла.

Исследования внутришлифовальных головок модели ВШГ-36 (при номинальной частоте вращения  $36\ 000\ \text{мин}^{-1}$ ) показали, что межремонтная долговечность электрошпинделей даже при подаче в них сжатого воздуха находится в пределах от нескольких часов до нескольких дней, т. е. намного меньше теоретических значений, рассчитанных по критерию усталости.

Основной причиной выхода из строя опор качения электрошпинделей оказался абразивный износ дорожек и тел вращения подшипников. На практике этот вид износа наблюдается при низкой герметичности уплотнений шпиндельного узла [1–3, 5].

Попадание загрязнений в опоры шпинделя до недавнего времени объясняли "каминным эффектом". При работе шпинделя ротор нагревается. Образовавшееся тепло через подшипники передается к шпиндельному валу, который, в свою очередь, нагревается. При останове шпинделя горячий вал нагревает окружающий воздух, который расширяется и, как в камине, поднимается вверх и часто несет с собой загрязнения, которые могут попасть внутрь герметизируемого узла [4].

В работе [6] показано, что "каминный эффект" для рассматриваемых скоростных шпиндельных узлов (электрошпинделей, внутришлифовальных головок и т. п.) является недостаточным для того,

чтобы частицы пыли или влаги могли попасть в опоры шпинделя. Более того, роль данного эффекта сомнительна даже для шпиндельных узлов, совмещенных с коробками скоростей или подач, т. е. узлов, которые располагают большими объемами воздушных полостей. Это объясняется тем, что тепловые процессы являются медленными, и скорости течения воздуха, обусловленные температурными расширениями или сжатиями, слишком малы для того, чтобы увлечь частицы пыли или влаги внутрь шпиндельного узла. Этот факт подтверждается многочисленными случаями, когда потеря герметичности уплотнений наступала еще до остановки вращения шпинделя. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что основное значение при герметизации быстроходных шпиндельных узлов имеют динамические процессы, происходящие в зазорах уплотнения.

Рассмотрим более подробно механизм потери герметичности бесконтактных уплотнений.

Расчетная схема уплотнения показана на рис. 2.

Оценить герметичность бесконтактных уплотнений при работе в жидких средах можно на основе уравнения Навье—Стокса

$$\frac{dV}{dt} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 V, \quad (1)$$

где  $V$  — вектор скорости жидкости;  $F$  — вектор массовых сил;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\text{grad} p$  — градиент давления;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости;  $\nabla^2$  — оператор Лапласа.

Теоретически задача течения жидкости в уплотнении может быть решена на основе схемы Шульца—Грунова, полученной на основе опытных данных. В соответствии с данной схемой в потоке выделяются три области (рис. 3). Первая и вторая области соответствуют пограничным слоям вблизи вращающегося диска и неподвижной стенки, третья область соответствует основной (средней) части течения жидкости, которая вращается в зазоре с некоторой угловой скоростью как квазитвердое тело.

Решение уравнения (1) для случая относительного равновесия жидкости в уплотнении находится

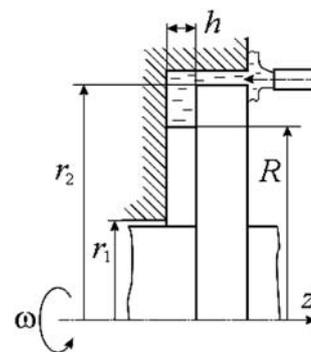


Рис. 2. Схема бесконтактного уплотнения

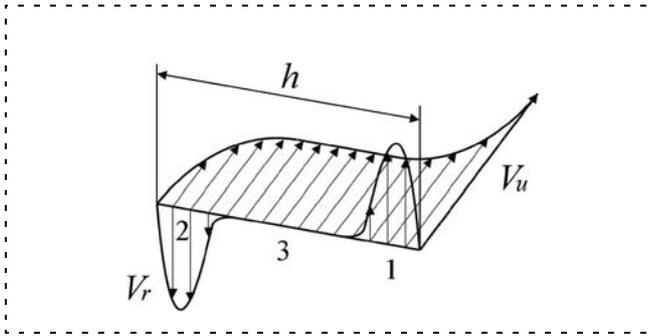


Рис. 3. Схема течения жидкости в зазоре уплотнения, где  $V_u$ ,  $V_r$  — окружная и радиальная составляющие скорости жидкости соответственно;  $h$  — зазор в уплотнении

для радиуса  $R$  границы раздела фаз воздух—жидкость в следующем виде [7]:

$$R = \sqrt{r_2^2 - \frac{2\Delta p_0}{\rho\beta^2\omega^2}}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_0$  — внешний перепад давления, приложенный к уплотнению;  $\rho$  — плотность герметизируемой среды;  $\beta$  — коэффициент закрутки потока (отношение угловых скоростей герметизируемой среды и шпинделя).

Согласно опытным данным [8, 9] коэффициент закрутки потока находится в пределах 0,4...0,5. Далее, зная внешний перепад давления, приложенный к уплотнению, по выражению (2) можно оценить герметичность уплотнения для заданных размеров и угловой скорости.

Если выполняется условие

$$R < r_1,$$

то герметичность шпиндельного узла не обеспечивается (первая критическая зона). Через уплотнение будет проходить жидкость вследствие того, что перепад давления, развиваемый уплотнением, мень-

ше внешнего перепада давления, приложенного к шпиндельному узлу. Этот случай соответствует относительно низким угловым скоростям.

С увеличением частоты вращения радиус границы раздела фаз воздух—жидкость может находиться в пределах

$$r_1 < R < r_2,$$

что соответствует области герметичности шпиндельного узла (зона оптимальной работы уплотнения).

При дальнейшем росте частоты вращения шпинделя давление, развиваемое уплотнением, будет также увеличиваться. Так как внешний перепад давления, приложенный к уплотнению, остается без изменения, граница раздела фаз будет смещаться к наружному радиусу уплотнения  $r_2$ .

Теоретически согласно выражению (2), а также в соответствии с существующими представлениями герметичность узла при этом становится максимальной. На самом деле, как показали результаты эксперимента, будет наблюдаться противоположный эффект. Вместо повышения герметичности при высоких частотах вращения шпинделя будет наблюдаться место ее снижения. Динамика течения жидкости в этом случае становится еще сложнее. Появляется вторая критическая зона. Начиная с некоторой критической частоты вращения, течение герметизируемой среды в зазоре уплотнения становится неустойчивым, возникает низкочастотный автоколебательный процесс (рис. 4, а). С ростом частоты вращения амплитуда колебаний увеличивается, происходит потеря герметичности уплотнения (рис. 4, б). Герметизируемая среда полностью покидает уплотнение, затем опять проникает в зазоры уплотнения.

Этот неожиданный эффект можно объяснить следующими причинами. С ростом угловых скоростей возрастают также и радиальные скорости течения жидкости [8, 10]. Это приводит к тому, что

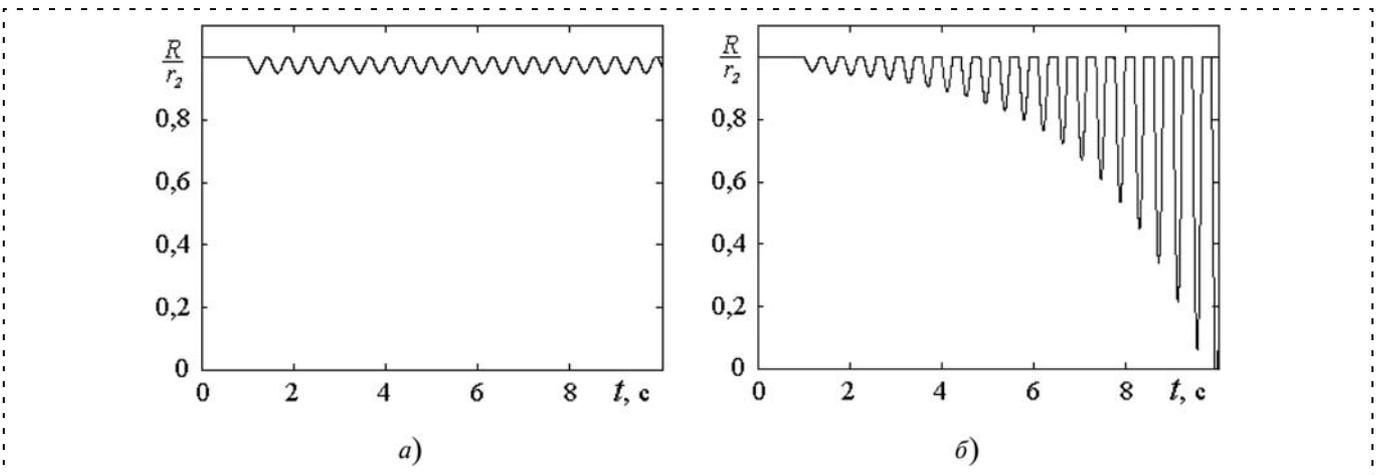


Рис. 4. Работа уплотнения во второй критической зоне: а — зона начальной турбулентности; б — зона развитой турбулентности

коэффициент закрутки потока становится переменной величиной, зависящей от времени и угловой скорости. Представим себе следующую ситуацию. В щель между неподвижной и движущейся плоскостями подается струя жидкости или газа. Так как любое материальное тело имеет инерцию, то поток не сразу приобретет составляющую скорости в направлении движения плоскости. Аналогично и для уплотнения. В момент входа в щель закрутка потока (окружная составляющая скорости) отсутствует. Лишь спустя некоторое время жидкость в зазоре уплотнения начинает вращаться с некоторой установившейся угловой скоростью.

Таким образом, коэффициент закрутки потока достигает установившихся значений с некоторым запаздыванием, а в момент входа в щель он близок к нулю, вследствие чего подкоренное выражение (2) становится отрицательным даже при очень больших угловых скоростях. Это означает, что уплотнение не обеспечивает герметичность узла. Полученные результаты были позднее подтверждены экспериментально зарубежными исследователями.

Процесс герметизации может быть описан следующим условием равновесия жидкости в зазоре уплотнения:

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + (\Delta p_C + \Delta p_0)S = 0, \quad (3)$$

где  $m$  — масса жидкости в зазоре уплотнения;  $\ddot{x}$  — ускорение потока в радиальном направлении;  $f$  — коэффициент жидкостного трения;  $\dot{x}$  — радиальная скорость потока;  $\Delta p_C$  — центробежный перепад давления, развиваемый уплотнением;  $S$  — площадь зазора.

Для области течения 1 (см. рис. 3) с учетом потерь на трение в зазоре уплотнения и ширины пограничного слоя [8, 10] получаем:

$$\frac{f}{m} = \frac{12\nu}{\delta^2}, \quad \delta = 3,7\sqrt{\frac{\nu}{\omega}}, \quad (4)$$

где  $\delta$  — ширина пограничного слоя.

Центробежный перепад давления, развиваемый уплотнением, с учетом соотношения (2) можно представить следующим приближенным соотношением:

$$\Delta p_C = \rho\beta^2\omega^2r_2(r_2 - R). \quad (5)$$

Масса жидкости в зазоре (пограничном слое вблизи вращающегося диска) выражается как

$$m = \rho S(r_2 - R) = 2\pi\rho r_2\delta(r_2 - R). \quad (6)$$

Соответственно, процесс разгона жидкости в окружном направлении при радиальном входе в щель

уплотнения более точно можно описать следующим, полученным из (1), уравнением:

$$\beta = \frac{1}{2} \left( 1 - e^{-\frac{2\sqrt{\nu\omega}}{kh}t} \right). \quad (7)$$

Полученное уравнение (7) подтверждает предположение о том, что на самом деле коэффициент закрутки потока находится в пределах 0,4...0,5 лишь при установившемся режиме течения (рис. 5).

Таким образом, для описания модели течения жидкости достаточно системы уравнений (3)—(7).

На рис. 6 показаны результаты моделирования течения в уплотнении при различных угловых скоростях шпинделя.

Если принять, что отношение внутреннего радиуса уплотнения к наружному равняется одной второй, то при угловых скоростях  $\omega_1$  и  $\omega_2$  будет иметь место работа в первой критической зоне, т. е. через уплотнение в шпиндельный узел будет проходить жидкость. При угловых скоростях  $\omega_3$  и  $\omega_4$  уплотнение обеспечивает высокую герметичность (зона

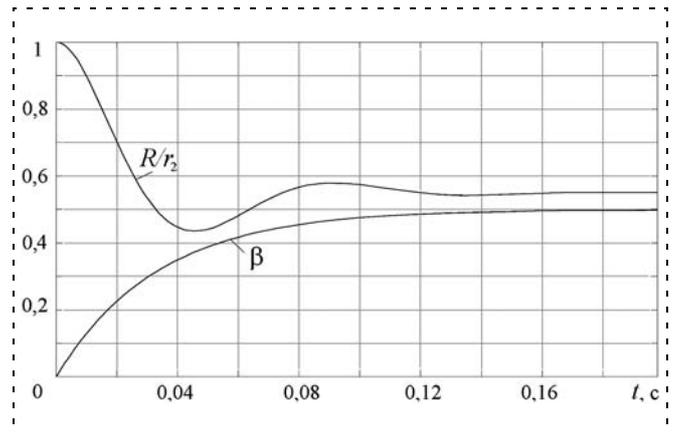


Рис. 5. Зависимость коэффициента закрутки потока и радиуса границы раздела фаз воздух—жидкость от времени

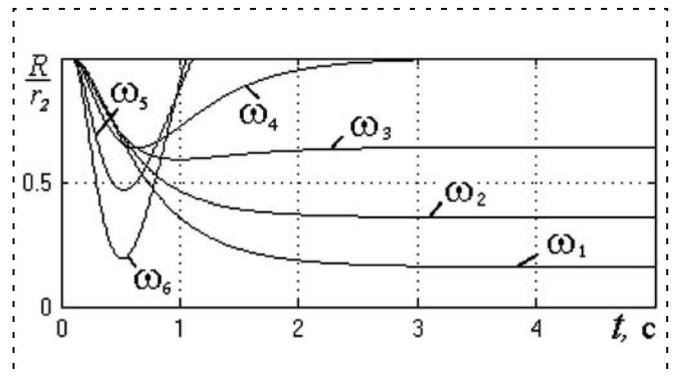


Рис. 6. Положение границы раздела фаз воздух—жидкость при разных угловых скоростях шпинделя ( $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4 < \omega_5 < \omega_6$ )

оптимальной работы уплотнения). При дальнейшем повышении скоростей ( $\omega_5$  и  $\omega_6$ ) положение зеркала жидкости становится неустойчивым, что приводит к потере герметичности уплотнения (вторая критическая зона).

### Выводы

1. Впервые выявлено существование зоны негерметичной работы в области высоких частот вращения шпинделя.

2. Показано, что в работе бесконтактных уплотнений шпиндельных узлов в зависимости от частоты вращения можно выделить три основные зоны, в двух из которых не обеспечивается их герметичность.

3. Впервые описан механизм потери герметичности в области высоких частот вращения шпинделя.

### Список литературы

1. **Детали** и механизмы металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. В. Каминская, А. С. Лapidус и др. М.: Машиностроение, 1972. Т. 2. 515 с.

2. **Кушнир А. П.** Долговечность шпиндельных узлов на опорах качения по критерию точность вращения в условиях абразивного износа // *Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении*. Сб. трудов Международной научно-практической конференции. М.: Машиностроение, 2010. С. 120—123.

3. **Kushnir A. P.** Passage of Pollutants through Contactless Seals with a Motionless Spindle // *Russian Engineering Research*. 2011. V. 31. N 1. P. 53—55.

4. **Устройство** и конструкция высокоскоростного электрошпинделя. URL: <http://www.sergeev-hsc.de/media/>

5. **Трение, износ и смазка** / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

6. **Кушнир А. П.** Механизм прохождения загрязнений через бесконтактные уплотнения при остановке вращения шпинделя. Сб. трудов Международной научно-практической конференции. М.: Машиностроение, 2010. С. 52—54.

7. **Лизогуб В. А., Кушнир А. П.** Современные уплотнительные устройства высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков. М.: ВНИИТЭМР, 1985. 44 с.

8. **Дорфман Л. А.** Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М.: ГИФМЛ, 1960. 260 с.

9. **Уплотнения** и уплотнительная техника / Л. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. Б. Овандер и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

10. **Кушнир А. П.** Моделирование течения вокруг вращающегося диска // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 7. С. 3—8.

## ИНФОРМАЦИЯ

9—11 октября 2012 г. в Санкт-Петербурге  
в ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» состоится

### 5-я Российская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2012)

*Председатель Президиума мультиконференции*  
академик РАН **В. Г. Пешехонов**

#### Состав мультиконференции

◆ **XXVIII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА  
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н. Н. ОСТРЯКОВА**

Конференция посвящается Б. Е. Чертоку — одному из легендарной плеяды создателей отечественной ракетно-космической техники, академику РАН

*Председатель программного комитета конференции —*

академик РАН **В. Г. Пешехонов**

◆ **КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ, ЭРГАТИЧЕСКИХ,  
ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ»**

Конференция посвящается памяти академика РАН В. М. Матросова

*Сопредседатели программного комитета конференции:*

академик РАН

**С. Н. Васильев**

член-корреспондент РАН

**И. А. Каляев**

член-корреспондент РАН

**Д. А. Новиков**

член-корреспондент РАН

**Г. Г. Себряков**

◆ **КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ»**

*Сопредседатели программного комитета конференции:*

член-корреспондент РАН **Р. М. Юсупов**

член-корреспондент РАН **В. Н. Васильев**

д. т. н., профессор

**В. М. Кутузов**

*Подробная информация о мультиконференции размещается на сайте:*

<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/mkpu2012/index.php>

*Контактная информация:*

Тел.: (812) 499-8157, 499-8210

E-mail: [mkpu@eprib.ru](mailto:mkpu@eprib.ru), [mgrishina@eprib.ru](mailto:mgrishina@eprib.ru)

УДК 62-5:004.8

**В. А. Виттих**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., науч. советник,  
vittikh@iccs.ru,

**М. В. Игнатъев**<sup>2</sup>, аспирант,  
Mikhail.Ignatyev@gmail.com,

**С. В. Смирнов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, директор,  
smirnov@iccs.ru,

<sup>1</sup>Институт проблем управления  
сложными системами РАН, г. Самара,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет,  
Высшая школа экономики — Нижний Новгород

## Онтологии в интересубъективных теориях

*Обосновывается необходимость использования для построения интересубъективных теорий пяти онтологий: корпоративной культуры, принятия решений, деятельности, фактов и нормативно-правовой онтологии.*

**Ключевые слова:** интересубъективность, онтология, интересубъективная теория, актор, проблемная ситуация

### Введение

Промышленные предприятия, органы государственного управления, школы, вузы, банки и т. п. можно рассматривать как интересубъективные системы [1], управление которыми осуществляется с применением интересубъективных теорий [2]. В отличие от классической научной теории в интересубъективной теории присутствуют субъекты (неоднородные акторы, находящиеся в проблемной ситуации) и средства организации их взаимодействия — система поддержки коммуникативных действий [3]. В структуру интересубъективной теории целесообразно включать пять типов интересубъективности: семантическую, логическую, операциональную, эмпирическую и нормативную [4].

Все эти виды интересубъективности нацелены на достижение взаимопонимания акторов в процессах принятия коллегиальных решений. И поскольку "понимание" органично связано с понятием "онтология", которое трактуется как множество вещей, которые существуют, и которое определяет, как эти вещи взаимосвязаны [5], в данной статье предлагается использовать именно онтологии для построения интересубъективных теорий.

### Онтология корпоративной культуры

Интерсубъективная теория включает в себя ограниченное множество людей-акторов, которые должны быть объединены общей культурой, которую часто называют корпоративной, поскольку в противном случае достижение взаимопонимания крайне затруднительно (или вообще невозможно) даже в том случае, когда неопределенность ситуации чрезвычайно мала и могла бы быть урегулирована на уровне локальных взаимодействий без использования каких-либо глобальных структур (например, нормативно-правовых актов). Семантическая интересубъективность в данном случае предполагает общее представление и согласие акторов о миссии корпорации, ее ценностных приоритетах и правилах корпоративного поведения. Вся эта совокупность соответствующих понятий и отношений между ними может быть выражена с помощью онтологии корпоративной культуры, позволяющей партнерам вести диалог "на одном языке", достаточно быстро понимая друг друга.

### Онтология принятия решений

Логическая интересубъективность связывается с достижением согласия акторов между собой в логике принятия решений. И это вовсе не означает, что имеется в виду классическая логика, базирующаяся на последовательности "понятие — суждение — умозаключение", поскольку, например, в герменевтической логике основным становится умозаключение. Умозаключение возникает тогда, "когда неопределенность, в которой обнаруживает себя человек, требует незамедлительного решения" [6]. Логика принятия решений может исходить из демократических или, наоборот, авторитарных принципов и т. д. Более того, в реальной жизни может использоваться не одна, а множество логик [7]. Описание этой совокупности в форме понятий и отношений будет представлять собой онтологию принятия решений, которая должна разделяться всеми акторами, участвующими в урегулировании проблемной ситуации.

### Онтология деятельности

Операциональная интересубъективность исходит из воспроизводимости образцов действий. При этом предполагается, что некоторая последовательность действий (технологий) общеобязательно приемлемым образом основана на данном образце. Отдельные элементы такой технологии и их последова-

тельность, составляющие данный образец, понимаются всеми однозначно и могут быть воспроизведены в том же виде. По-существу, речь идет о "допустимых технологиях" деятельности, которые могут быть использованы на основе общего согласия (консенсуса). Совокупность этих видов деятельности может быть представлена в форме онтологии деятельности, включающей в себя описание технологий с указанием ответственности за их реализацию (как это, например, было сделано в работе [8]). Онтология деятельности, таким образом, будет не только обеспечивать ее регламентацию, но и содействовать повышению уровня персональной ответственности акторов.

### Онтология фактов

Эмпирическая интерсубъективность предполагает необходимой обоснованность суждений фактами, которые должны признаваться всеми акторами, находящимися в проблемной ситуации, поскольку в противном случае взаимопонимание становится проблематичным. Поэтому значимой становится разработка онтологии фактов, которые должны быть классифицированы по степени их достоверности: от слухов, порождающих сомнения, до прецедентов, позволяющих использовать случаи, имевшие место в прошлом, для оправдания принимаемых решений в настоящем. При этом, конечно же, в онтологию не включаются факты, которые имели место, но, по мнению акторов (по каким-то причинам) не должны приниматься во внимание.

### Нормативно-правовая онтология

Общепринятость норм и правил поведения или оценки предполагает нормативная интерсубъективность, в соответствие которой может быть поставлена нормативно-правовая онтология, содержащая взаимосвязанную совокупность законов, приказов, стандартов, соглашений и иных нормативных документов, которая обеспечивает регулирование отношений акторов на некотором уровне неопределенности ситуации. Если же степень неопределенности возрастает, превышая допустимый порог, вырабатываются новые правила взаимодействия акторов, трансформирующие нормативно-право-

вую онтологию, а это означает, что должен быть обеспечен постоянный мониторинг нормативно-правовой базы. Такие онтологии, реализованные в виде компьютерных нормативно-правовых баз знаний, использовались, в частности, при разработке региональной системы представления государственных и муниципальных услуг в электронной форме населению Самарской области [9].

### Заключение

Предложенные онтологии могут быть использованы в качестве основы при построении интерсубъективных теорий, а их практическое применение должно повысить эффективность процессов достижения взаимопонимания неоднородных акторов при урегулировании проблемных ситуаций.

### Список литературы

1. **Виттих В. А.** Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 1. С. 53–55.
2. **Виттих В. А.** Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 2–6.
3. **Виттих В. А., Игнатъев М. В., Смирнов С. В.** Системы поддержки коммуникативных действий. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. XIII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 369–371.
4. **Хьюбер К.** Истина мифа. М.: Республика, 1996.
5. **Merrill G. H.** The Babylon Project: Towards an Extensible Text-Mining Platform // IEEE IT Pro. March–April 2003. IEEE Computer Society, 2003.
6. **Михайлов И. А.** Герменевтическая логика Г. Шпета и Г. Липпса // Творческое наследие Густава Густавовича Шпета в контексте философской проблемы формирования историко-культурного сознания (междисциплинарный аспект). Томск: Изд-во Томского университета, 2003. С. 114–123.
7. **Шуман А. Н.** Современная логика: теория и практика. Мн.: Экономпресс, 2004.
8. **Виттих В. А., Ситников П. В., Смирнов С. В.** Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 5. С. 45–53.
9. **Виттих В. А., Волхонцев Д. В., Гриценко Е. А., Светкина Г. Д., Скобелев П. О., Сурнин О. Л.** Региональная система предоставления государственных и муниципальных услуг населению в электронной форме с применением интегрированных баз знаний и мультиагентных технологий в социальной сфере Самарской области. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. XI Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2009. С. 411–414.

# CONTENTS

**Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M.** Accuracy Characteristics Definition of Nonlinear Dynamic Systems Condition Parameters Variation Estimations. . . . . 2

*One considers the correlation matrix definition ways of condition parameters estimations of the nonlinear dynamic systems received on the basis of the variation approach application to estimation at the normal law of errors distribution measurements.*

**Keywords:** statistical estimation, correlation matrix, nonlinear dynamic systems, normal law of distribution

**Kravchenko P. P.** Algorithm Synthesis of Digital Control of a Inverted Pendulum-Cart System Using the Theori of Second Order Delta Transformations . . . . . 6

*The solution of the present task is based on the most complete of the known corresponding non-linear systems of differential equations of movement and using the methods of the optimized second order delta-transformations. Algorithm synthesis unified for controlling a pendulum position on a cart has been examined, the possibility of gaining guaranteed quality index on accuracy and performance rate has been shown, the results of the modeling experiments at the permanent and changing specifying influences, different kinds of friction force have been highlighted.*

**Keywords:** inverted pendulum-cart system, non-linear differential equations, optimized second order delta-transformations, guaranteed quality index, performance and accuracy optimization, friction, specifying influences

**Sergeev S. F.** Operator's Activity Adaptive Automation in Immersive Interface Environment of Mechatronics Moving Object . . . . . 15

*The present article is devoted to the issues of engineering psychology designing mechatronics moving object (MMO) operator's activity using the classical activity theory. We discussed the adaptive automation in virtual immersive environments and described the main problems of MMO operator's activity design. We also showed the main tendencies of adaptive automation's methods development based on induced virtual immersive environment technology.*

**Keywords:** virtual interface, activity, activity theory, mechatronics, ergatic system, human machine interface (HMI)

**Oboznov A. A., Volkov E. V., Chernetskaya E. D.** Image-Conceptual Models in the Activity of Operators of Complex Ergatic Systems . . . . . 21

*The role of image-conceptual model to ensure the effective operation of the operators of complex ergatic systems is shown. The results of empirical survey of the content and structures of the image-conceptual models of nuclear power plants operators are represented. The influence of successful performance of operators on distinctive features of structures of image-conceptual models are revealed.*

**Keywords:** image-conceptual model, complex ergatic system, nuclear power plants operators, psycho semantic method

**Paderno P. I., Pavlukhin I. S., Smirnov A. V.** Extension of Functional-Structural Theory for Quality Assessment of Ergatic Systems Operator Activity . . . . . 31

*Quality assessing of discrete activity algorithms execution problem is described. A number of approaches directed to evaluate and use analytic estimations of faultless primitive algorithm execution in different conditions are proposed: different types of faults occurrence; interval estimated source probabilities.*

**Keywords:** activity algorithms, standard functional structures, different types of faults, interval estimates, probabilistic estimates

**Dudarenko N. A., Serzhantova (Polyakova) M. V., Ushakov A. V.** Presentation Productive Activity of Human—Operator with Interval Parameters by Continuous Dynamic Model . . . . . 36

*Transmission function of human-operator carrying out productive activity with interval parameters presentation is solved. The offered model is used for an estimation influences of interval parameters on the results of productive process.*

**Keywords:** human-operator, production, curve of change of the labour productivity, exponential approximation, transmission function with interval parameters

**Makarov I. M., Lohin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kuchersky R. V., Hudak Yu. I.** Action Planning and Tasks Distribution Models and Algorithms for Multiagent Robotic Systems. . . . . 44

*The action planning and tasks distribution models and algorithms for multiagent robotic systems are discussed. The proposed models and algorithms are based on finite-state machine and multicriteria choice theories.*

**Keywords:** multiagent robotic system, group robot control, finite-state machine, multicriteria choice

**Maloletov A. V., Briskin E. S., Kolesov A. M.** Reconfigurable Modular Walking Machine Gaits with Orthogonally-Rotating Movers ..... 50

*Walking modular structure machine with ability of the kinematic scheme reconfiguration are discussed. The gaits types for machines with movers that contain two or more walking mechanisms are described. The problem of the required number determining and type of actuator modules for the walking machine "Ortonog" are solved, that is allow to do any programmed motion of the body. When some actuator modules are unused, the allowable gaits and motion constraints are defined.*

**Keywords:** walking machine, modular structure, reconfiguration, gait, walking mover, motion control

**Ivanov V. M.** Identification of Parameters and Algorithms of Self-Adjustment in Systems of Stabilization of Cutting Force ..... 56

*The mathematical description of cutting process as element with variable parameters which distinctive features are connected with definition of transitive modes and parameters of management through real coordinates of a control system and adaptive model is given. Principles of realization of self-adjusted systems of limiting regulation are considered. Results of modelling of systems of regulation of cutting effort, including CNC systems with the servo drive are resulted. Recommendations on distribution of problems of control and algorithmic maintenance of CNC systems are given.*

**Keywords:** machine tool construction, mechatronic systems, process of cutting, the adaptive model, self-adjusted systems of regulation, numerical program control (CNC)

**Kushnir A. P.** Research of Self-Oscillatory Processes in Sealing Devices of Mechatronic Spindles ..... 64

*Proof leakage of mechatronic spindles is considered, the mechanism of loss of leaktightness is described at high angular speeds of rotation of a spindle. Results of modeling of processes of hermetic sealing are resulted. The received conclusions are actual for electrospindles, grinding heads and other high-speed devices working in the conditions of polluted atmosphere.*

**Keywords:** spindle assembly, leaktightness, electrospindle, high-node, non-contact seal, simulation

**Vittikh V. A., Ignatyev M. V., Smirnov S. B.** Ontologies in the Intersubjective Theories ..... 69

*The necessity of using five ontologies such as the corporate culture ontology, the decision making ontology, the activity ontology, the facts ontology and the standard-legal ontology it is proved for constructing the intersubjective theories.*

**Keywords:** intersubjectivity, ontology, intersubjective theory, actor, problem situation

---

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

---

Сдано в набор 01.03.2012. Подписано в печать 20.04.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,82. Заказ МН512. 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.