Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

6

2015

Главный редактор
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЛЕГИЯ:

Бучаченко А.Л. — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю. И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А. П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г. за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство "Машиностроение"

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., 2А.
Тел.: (495) 661-38-80.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.
Тел.: (499) 268-38-58.
Факс: (499) 269-48-97.

© Издательство "Машиностроение",
© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Инвариантное управление маловысотным полётом одновинтового вертолёта 3

Лян Цин, Чжан Сяобин. Нелинейная математическая модель погрешностей БИНС 8

Гладышев В.О., Тиунов П.С., Портнов Д.И., Терешин А.А., Гладышева Т.М., Челноков М.Б., Базлева Д.Д. Автоматизированный лабораторный измерительный комплекс для исследования эффектов оптики движущихся сред 15

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Калугин В.Т., Епихин А.С. Численное моделирование нестационарных вихревых течений с использованием открытого пакета OpenFoam 21

Алфимцев А.Н., Хает Ф.И. Гендерные различия в восприятии информации и организации пользовательского интерфейса компьютерных систем 25

Овчинников В.А., Иванова Г.С. Использование оптимизирующих преобразований в алгоритме декомпозиции гиперграфов 29

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Рачковская Н.А. Дистанционное обучение лиц с особыми образовательными потребностями 36

Александров А.А., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Ван Сяофэн, Хэ Юн, Кай Шэнь. Разработка концепции комплексной непрерывной инженерной подготовки 40

CONTENTS

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Mikrin E.A., Zubov N.E., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. Low-altitude flight invariant control of a single-rotor helicopter 3

Lyan Tsyn, Chzhan Syaobin. The non-linear mathematical model of PFINS errors 8

Gladyshev V.O., Tiunov P.S., Portnov D.I., Tereshin A.A., Gladysheva T.M., Chelnokov M.B., Bazleva D.D. Automatic laboratory measuring complex for studying of the moving media optics effects 15

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Kalugin V.T., Epikhin A.S. Numerical simulation of unsteady vortex flows through the use of an active packet OpenFoam 21

Alfimtsev A.N., Khaet F.I. Gender differences in the information perception and organization of the computer systems user interface 25

Ovchinnikov V.A., Ivanova G.S. Use of optimizing transformations in the algorithm of hypergraphs decomposition 29

EDUCATIONAL TECHNOLOGY

Rachkovskaya N.A. Distance education of persons with special educational needs 36

Aleksandrov A.A., Proletarskiy A.V., Neusypin K.A., Van Syaofen, Khe Yun, Kay Shen. Concept development of continuous complex engineering training 40

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 01.04.2015.
Подписано в печать 25.05.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация. Современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Машиностроение",
© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2015

УДК 517.977

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, акад. РАН, **Н.Е. Зубов,** д-р техн. наук,
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук, **В.Н. Рябченко,** д-р техн. наук
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
nik.zubov@gmail.com

ИНВАРИАНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАЛОВЫСОТНЫМ ПОЛЁТОМ ОДНОВИНТОВОГО ВЕРТОЛЁТА

Для линеаризованной математической модели восьмого порядка пространственного движения одновинтового вертолёта решена задача синтеза инвариантного управления, позволяющего обеспечить независимость вертикальной скорости от возмущений при маловысотном полёте и одновременно с этим заданный запас устойчивости. Таким образом, синтезированный в данной работе закон управления одновинтового вертолёта решает две задачи: обеспечение инвариантного управления и придание желаемой динамики свободному движению замкнутой системы. Получение данного результата возможно только с использованием множества эквивалентных законов управления и является нетривиальным примером использования этого множества в интересах обеспечения качества управления сложным авиационным объектом.

Ключевые слова: математическая модель вертолёта; инвариантное управление; закон управления; возмущения; запас устойчивости.

The problem of invariant control synthesis is enable to provide the vertical velocity independence from the perturbations at the low-altitude flight and simultaneously given the stability reserve, is solved for the linearized eight order mathematical model of single-rotor helicopter spatial movement. Thus, synthesized in this work single-rotor helicopter control law solves two tasks: ensuring the invariant control and giving the desired dynamics of the closed system free movement. Getting this result is only possible through the use of a variety of equivalent control laws and is non-trivial utilization example of this set in order to ensure quality control of complex aircraft object.

Key words: mathematical model of the helicopter; invariant control; control. law; perturbation; stability reserve.

Введение и постановка задачи. Опыт решения различных народнохозяйственных задач, особенно в труднодоступных районах, показывает, что вертолёты являются незаменимым транспортным средством. Одним из основных режимов полёта вертолёта являются малые высоты. Вместе с тем полёт вертолёта на малых высотах характеризуется рядом особенностей [1]:

высоким уровнем психофизиологической нагрузки на членов экипажа и значительным сокращением резервов внимания лётчика;

высокой загрузкой экипажа при управлении;

ограничением маневренных возможностей вертолёта при облёте препятствий, обусловленных необходимостью точного выдерживания высоты полёта и пилотажных параметров;

острым дефицитом времени на принятие решения о выполнении маневра;

сложностью визуального определения лётчиком высоты полёта, особенно ночью и в сложных метеоусловиях.

В результате повышается вероятность ошибочных действий лётных экипажей, что приводит к росту количества авиационных происшествий. Причиной этого являются неблагоприятные характеристики устойчивости и управляемости вертолёта как объекта управления и различные возмущения, воздействующие на контур управления. При этом наиболее критическим параметром при действии возмущений является высота полёта. Для увеличения уровня безопасности полёта на малых высотах необходимо синтезировать систему управления, позволяющую обеспечить "нечувствительность" высоты полёта к различным возмущениям, и необходимые характеристики устойчивости и управляемости вертолёта.

Формализация и решение задачи. Формализуем постановку задачи. Для этого представим пространственное движение лёгкого одновинтового вертолёта моделью в пространстве состояний [2]:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \boldsymbol{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{B}\mathbf{u} + \boldsymbol{F}\mathbf{w},\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \\ \mathbf{y} &= \boldsymbol{C}\mathbf{x}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

В данном случае вектор состояния имеет вид

$$\mathbf{x} = (v_x|v_y|v_z|\omega_x|\omega_y|\omega_z|\gamma|\vartheta)^{\mathrm{T}}, \qquad (2)$$

где v_x, v_y, v_z — приращения линейных скоростей движения центра масс вертолёта; ω_x, ω_y, ω_z — при-

ращения угловых скоростей вращения вертолёта вокруг его центра масс; ϑ, γ — приращения углов тангажа и крена соответственно.

Управляемое движение вертолёта осуществляется изменением компонентов вектора управления:

$$\mathbf{u} = (u_z|u_x|u_{\text{ош}}|u_{\text{рв}})^{\text{т}}, \qquad (3)$$

где u_z, u_x — углы отклонения конуса несущего винта в продольном и поперечном направлениях; $u_{\text{ош}}$ — общий шаг несущего винта; $u_{\text{рв}}$ — шаг рулевого винта.

Матрицы математической модели вертолёта имеют следующий слаборазреженный вид:

$$A = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c}
a_{v_x}^{v_x} & a_{v_x}^{v_y} & a_{v_x}^{v_z} & a_{v_x}^{\omega_x} & a_{v_x}^{\omega_y} & a_{v_x}^{\omega_z} & a_{v_x}^{\gamma} & a_{v_x}^{\theta} \\ \hline
a_{v_y}^{v_x} & a_{v_y}^{v_y} & a_{v_y}^{v_z} & a_{v_y}^{\omega_x} & 0 & a_{v_y}^{\omega_z} & a_{v_y}^{\gamma} & a_{v_y}^{\theta} \\ \hline
a_{v_z}^{v_x} & a_{v_z}^{v_y} & a_{v_z}^{v_z} & a_{v_z}^{\omega_x} & a_{v_z}^{\omega_y} & a_{v_z}^{\omega_z} & a_{v_z}^{\gamma} & a_{v_z}^{\theta} \\ \hline
a_{\omega_x}^{v_x} & a_{\omega_x}^{v_y} & a_{\omega_x}^{v_z} & a_{\omega_x}^{\omega_x} & a_{\omega_x}^{\omega_y} & a_{\omega_x}^{\omega_z} & 0 & 0 \\ \hline
a_{\omega_y}^{v_x} & a_{\omega_y}^{v_y} & a_{\omega_y}^{v_z} & a_{\omega_y}^{\omega_x} & a_{\omega_y}^{\omega_y} & a_{\omega_y}^{\omega_z} & 0 & 0 \\ \hline
a_{\omega_z}^{v_x} & a_{\omega_z}^{v_y} & a_{\omega_z}^{v_z} & a_{\omega_z}^{\omega_x} & a_{\omega_z}^{\omega_y} & a_{\omega_z}^{\omega_z} & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 1 & a_{\gamma}^{\omega_y} & a_{\gamma}^{\omega_z} & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0 & a_{\theta}^{\omega_y} & a_{\theta}^{\omega_z} & 0 & 0
\end{array}\right); \qquad (4)$$

$$B = \left(\begin{array}{c|c|c|c}
b_{v_x}^{u_x} & b_{v_x}^{u_y} & b_{v_x}^{u_{\text{ош}}} & 0 \\ \hline
b_{v_y}^{u_x} & b_{v_y}^{u_y} & b_{v_y}^{u_{\text{ош}}} & 0 \\ \hline
b_{v_z}^{u_x} & b_{v_z}^{u_y} & b_{v_z}^{u_{\text{ош}}} & b_{v_z}^{u_{\text{рв}}} \\ \hline
b_{\omega_x}^{u_x} & b_{\omega_x}^{u_y} & b_{\omega_x}^{u_{\text{ош}}} & b_{\omega_x}^{u_{\text{рв}}} \\ \hline
b_{\omega_y}^{u_x} & b_{\omega_y}^{u_y} & b_{\omega_y}^{u_{\text{ош}}} & b_{\omega_y}^{u_{\text{рв}}} \\ \hline
b_{\omega_z}^{u_x} & b_{\omega_z}^{u_y} & b_{\omega_z}^{u_{\text{ош}}} & b_{\omega_z}^{u_{\text{рв}}} \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0
\end{array}\right), \qquad (5)$$

где a_*^* b_*^* — коэффициенты (передаточные отношения) модели.

На одном из режимов полёта гипотетического вертолёта модель характеризуется следующими числовыми матрицами коэффициентов:

$$A = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c}
-0,0598 & -0,0233 & -0,0002 & 0,003 & 0,006 & 0,1095 & -0,0008 & -0,1703 \\ \hline
-0,0268 & -0,8899 & -0,0269 & -0,0067 & 0 & -1,2091 & 0,0107 & -0,0135 \\ \hline
-0,0025 & 0,0107 & -0,1944 & -0,1084 & 1,2038 & 0,0022 & 0,1703 & 0,0008 \\ \hline
0,8996 & 6,3374 & -7,0135 & -6,2574 & -0,1909 & -2,7761 & 0 & 0 \\ \hline
-1,3637 & 0,8308 & -3,1229 & 0,1054 & -0,8687 & 0,5274 & 0 & 0 \\ \hline
1,5158 & -2,3207 & -0,3438 & 0,6389 & -0,0004 & -2,2364 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 1 & 0,0788 & -0,0049 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0 & 0,0626 & 0,998 & 0 & 0
\end{array}\right); \qquad (6)$$

$$B = \left(\begin{array}{c|c|c|c}
-0,3050 & 0,0359 & -0,0228 & 0 \\ \hline
-1,2817 & 0,4005 & 2,089 & 0 \\ \hline
-0,0039 & -0,2792 & -0,023 & -0,1038 \\ \hline
-0,2863 & -135,3251 & -13,7479 & -2,3208 \\ \hline
-18,03 & 3,5072 & 10,3189 & -13,1535 \\ \hline
28,178 & -0,9659 & 22,7255 & -0,1517 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & 0
\end{array}\right). \qquad (7)$$

Топологическая структура матрицы собственной динамики представлена на рисунке.

Здесь видна сильная изрезанность "рельефа" матрицы, вызванная наличием перекрёстных связей.

Модель с числовыми матрицами (6), (7) характеризуется как неустойчивая, так как имеет множество полюсов:

$$\text{eig}(\boldsymbol{A}) = \{-6{,}1349;\ -3{,}501;\ -0{,}4128 \pm 2{,}0366i;\ -0{,}4669;\ -0{,}0375;\ 0{,}2297 \pm 0{,}3592i\}, \qquad (8)$$

и обладает сильно развитыми перекрёстными связями между каналами движения и управления (продольным, поперечным, путевым и вертикальным).

В вектор состояния (2) не введена высота. Тем не менее в практическом плане обеспечение инвариантности высоты полёта вертолёта H будет соответствовать инвариантности вертикальной скорости v_y, так как вертикальная скорость и высота при малых углах тангажа ϑ и крена γ связаны дифференциальным уравнением

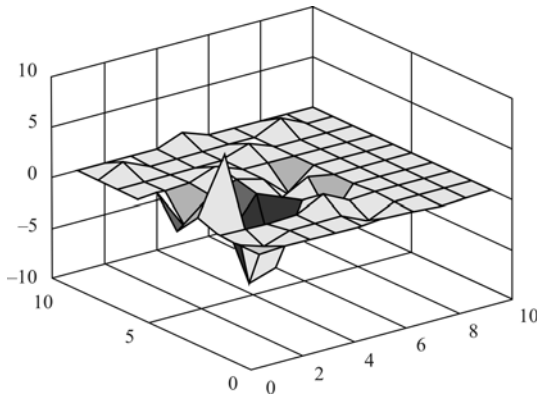
$$\dot{H} = v_y. \qquad (9)$$

Кроме этого, на ряде отечественных и зарубежных вертолётов при стабилизации высоты полёта используется именно вертикальная скорость v_y.

Таким образом, нас интересует изменение именно вертикальной скорости. В связи с этим, используя матрицу $\boldsymbol{C}$ вида

$$\boldsymbol{C} = (0|1|0|0|0|0|0|0), \qquad (10)$$

выделим вертикальную скорость из вектора состояния.



Топологическая структура матрицы *A* модели вертолёта

В общем случае возмущения, действующие на вертолёт в процессе движения, характеризуются матрицей $\boldsymbol{F}$ [2]:

$$\boldsymbol{F} = \mathrm{diag}(f_1, f_2, f_3, ..., f_8). \qquad (11)$$

Возмущения могут быть вызваны, например, порывами ветра, сбросом груза, ошибками датчиков и т.д. Легко проверить, что все компоненты вектора возмущений влияют на вертикальную скорость.

Исходя из этого, сформулируем задачу следующим образом. Для объекта (1)—(3) с матрицами коэффициентов (6), (7) необходимо синтезировать закон управления

$$\mathbf{u} = -K\mathbf{x}, \qquad (12)$$

обеспечивающий инвариантность вертикальной скорости v_y к возмущениям, задаваемым матрицей (11). Кроме того, вследствие неудовлетворительных характеристик устойчивости и управляемости, помимо инвариантности v_y, требуется обеспечить заданное расположение полюсов замкнутой системы.

Таким образом, задача синтеза системы управления состоит из обеспечения инвариантности и заданного расположения полюсов замкнутой системы.

Начнём с проверки необходимого условия инвариантности

$$\boldsymbol{CF} = \mathbf{0}. \qquad (13)$$

Очевидно, что произведение матриц (10) и (11) будет тождественно равно нулю только при $f_2 = 0$. Это значит, что возмущения, непосредственно воздействующие на $\dot{v}_y$, никакой обратной связью парировать невозможно. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать матрицу возмущений вида

$$\boldsymbol{F} = \mathrm{diag}(f_1, 0, f_3, ..., f_8). \qquad (14)$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся конечными формулами разработанного метода [1, 3].

Множество инвариантных законов управления вертолётом. Множество инвариантных законов управления будем искать в виде

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв}} = \boldsymbol{K}_1 + \boldsymbol{K}_2\xi + \beta\boldsymbol{K}_3. \qquad (15)$$

Для нахождения матриц $\boldsymbol{K}_1$, $\boldsymbol{K}_2$, $\boldsymbol{K}_3$ используем выражения, полученные на основе ленточных критериев управляемости.

Осуществим разложение [4, 5] матриц $\boldsymbol{F} \to \left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}, \boldsymbol{F}_R^{\perp}, \boldsymbol{F}^{-}\right)$, $\boldsymbol{C} \to \left(\boldsymbol{C}_L^{\perp}, \boldsymbol{C}_R^{\perp}, \boldsymbol{C}^{-}\right)$ и произведений матриц $\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B} \to \left(\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp}, \left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_R^{\perp}, \left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)^{-}\right)$, $\boldsymbol{CB} \to \left((\boldsymbol{CB})_L^{\perp}, (\boldsymbol{CB})_R^{\perp}, (\boldsymbol{CB})^{-}\right)$.

Получим

$$\boldsymbol{F}_L^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}; \quad \boldsymbol{F}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{F}^{-} = \begin{pmatrix} \frac{1}{f_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{f_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{f_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{f_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{f_7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{f_8} \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{C}_L^{\perp} = 0; \boldsymbol{C}_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \boldsymbol{C}^{-} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B} = \boldsymbol{CB} = \left(-1,2817 \mid 0,4005 \mid 2,089 \mid 0\right);$$

$$\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp} = (\boldsymbol{CB})_L^{\perp} = 0;$$

$$\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_R^{\perp} = (\boldsymbol{CB})_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -0,1917 & 0,6135 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)^{-} = (\boldsymbol{CB})^{-} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,4787 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что условия разрешимости

$$\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp}\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{A}\boldsymbol{F} = \left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp}\boldsymbol{C}\boldsymbol{A}\boldsymbol{C}_R^{\perp} = \boldsymbol{0} \qquad (16)$$

выполняются всегда вследствие тождественного равенства нулю делителей нуля произведений матриц:

$$\left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp} = \left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{B}\right)_L^{\perp} = 0\,. \qquad (17)$$

Вычислим искомые матрицы:

$$\boldsymbol{K}_1 = \left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)^{-}\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{A}\boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{-} =$$

$$= \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -0,0128 & 0 & -0,0129 & -0,0032 & 0 & -0,5788 & 0,0051 & -0,0064 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right); \qquad (18)$$

$$\boldsymbol{K}_2 = \left(\boldsymbol{F}_L^{\perp}\boldsymbol{B}\right)_R^{\perp} = \left(\begin{array}{c|c|c} 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline -0,1917 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array}\right); \qquad (19)$$

$$\boldsymbol{K}_3 = \boldsymbol{F}_L^{\perp} = \left(0 \mid 1 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0\right) \qquad (20)$$

или

$$\boldsymbol{K}_1 = \left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{B}\right)^{-}\boldsymbol{C}\boldsymbol{A}\boldsymbol{C}_R^{\perp}\left(\boldsymbol{C}_R^{\perp}\right)^{-} =$$

$$= \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -0,0128 & 0 & -0,0129 & -0,0032 & 0 & -0,5788 & 0,0051 & -0,0064 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right); \qquad (21)$$

$$\boldsymbol{K}_2 = \left(\boldsymbol{C}\boldsymbol{B}\right)_R^{\perp} = \left(\begin{array}{c|c|c} 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline -0,1917 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array}\right); \qquad (22)$$

$$\boldsymbol{K}_3 = \boldsymbol{C} = \left(0 \mid 1 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0\right). \qquad (23)$$

Заметим, что множество инвариантных регуляторов в данном случае может быть записано в обобщённом виде:

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв}} = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -0,0128 & 0 & -0,0129 & -0,0032 & 0 & -0,5788 & 0,0051 & -0,0064 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right) +$$

$$+ \left(\begin{array}{c|c|c} 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline -0,1917 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array}\right)\left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \xi_{14} & \xi_{15} & \xi_{16} & \xi_{17} & \xi_{18} \\ \hline \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} & \xi_{25} & \xi_{26} & \xi_{27} & \xi_{28} \\ \hline \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} & \xi_{34} & \xi_{35} & \xi_{36} & \xi_{37} & \xi_{38} \end{array}\right) +$$

$$+ \left(\begin{array}{c} \beta_{11} \\ \hline \beta_{21} \\ \hline \beta_{31} \\ \hline \beta_{41} \end{array}\right)\left(0 \mid 1 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0 \mid 0\right). \qquad (24)$$

Можно проверить, что выполняются все тождества вида

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{\text{инв}})\boldsymbol{F} = \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{\text{инв}})^2\boldsymbol{F} = \\ = \boldsymbol{0},\ \ldots,\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{\text{инв}})^7\boldsymbol{F} = \boldsymbol{0}.$$

Матрица динамики полёта вертолёта, например, замкнутая компонентой регулятора $\boldsymbol{K}_1$ ($\xi = 0$, $\beta = 0$), имеет вид

$$\boldsymbol{A}_{\text{инв}} = \boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_1 =$$

$$= \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} -0,0601 & -0,0233 & -0,0005 & 0,0029 & 0,006 & 0,0963 & -0,0007 & -0,1705 \\ \hline 0 & -0,8899 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -0,0028 & 0,0107 & -0,1947 & -0,1084 & 1,2038 & -0,0111 & 0,1705 & 0,0007 \\ \hline 0,7232 & 6,3374 & -7,1905 & -6,3014 & -0,1909 & -10,7333 & 0,0703 & -0,0885 \\ \hline -1,2314 & 0,8308 & -2,99 & 0,1384 & -0,8687 & 6,5 & -0,0527 & 0,0665 \\ \hline 1,81 & -2,3207 & -0,0512 & 0,7116 & -0,0004 & 10,9171 & -0,1162 & 0,1464 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0,0788 & -0,0049 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0626 & 0,998 & 0 & 0 \end{array}\right)$$

и собственные значения

$$\begin{aligned} &\operatorname{eig}\left(\boldsymbol{A}_{\text{инв}}\right) = \{-5,9716;\ -1;\ -0,4192 \pm 1,7623i; \\ &-0,2768;\ -0,0429;\ 0,1536;\ 10,468\}. \end{aligned} \qquad (25)$$

Из (25) видно, что инвариантная система имеет большой по величине неустойчивый полюс, равный 10,468. Для устранения этого недостатка можно воспользоваться оставшимися степенями свободы в выражении (24), поэтому перейдём к решению второй части задачи.

Инвариантность и обеспечение устойчивости. Пусть, кроме инвариантности, требуется обеспечить заданное расположение полюсов замкнутой системы согласно множеству

$$\begin{aligned} &\operatorname{eig}\left(\boldsymbol{A}_{\text{инв},\Lambda}\right) = \\ &= \{-2, -2, -2, -3, -3, -3, -1, -1\}. \end{aligned} \qquad (26)$$

Для этого воспользуемся выражением регулятора на основе уравнения Сильвестра

$$\boldsymbol{K}_{\Lambda} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{X}^{-1}. \qquad (27)$$

Вследствие различия всех полюсов разомкнутой и замкнутой систем $\left(\lambda_i^A \neq \lambda_j^{\Lambda}\right)$ никакие ограничения на матрицу $\boldsymbol{N}$ (выражение (27)) не накладываются, а искомые выражения примут вид [1]

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{R}^A\widehat{\boldsymbol{X}}\,; \qquad (28)$$

$$\widehat{X}_{ij} = \lambda_{ij}^{A\Lambda}\boldsymbol{L}_i^A\boldsymbol{B}\boldsymbol{N}_j\,; \qquad (29)$$

$$\lambda_{ij}^{A\Lambda} = \frac{1}{\lambda_i^A - \lambda_j^{\Lambda}}. \qquad (30)$$

В результате множество законов управления, обеспечивающих заданное расположение полюсов замкнутой системы, удовлетворяющих условиям инвариантности, может быть найдено по

формуле (27). В данном случае обратимая матрица $\boldsymbol{X}$ запишется в виде

$$\boldsymbol{X} = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{42} & n_{43} & n_{24} & n_{15} & n_{16} & n_{27} & n_{28} \\ n_{21} & n_{32} & n_{33} & n_{14} & n_{25} & n_{26} & n_{47} & n_{48} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} & x_{37} & x_{38} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} & x_{47} & x_{48} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & x_{54} & x_{55} & x_{56} & x_{57} & x_{58} \\ n_{41} & n_{12} & n_{13} & n_{34} & n_{45} & n_{46} & n_{37} & n_{38} \\ x_{71} & x_{72} & x_{73} & x_{74} & x_{75} & x_{76} & x_{77} & x_{78} \\ n_{31} & n_{22} & n_{23} & n_{44} & n_{35} & n_{36} & n_{17} & n_{18} \end{pmatrix}, \qquad (31)$$

где

$x_{31} = -22,1077n_{11} + 1,3192n_{21} + 24,8196n_{31} + 9,2775n_{41};$
$x_{32} = 9,2775n_{12} + 24,8196n_{22} + 1,3192n_{32} - 22,1077n_{42};$
$x_{33} = 9,2775n_{13} + 24,8196n_{23} + 1,3192n_{33} - 22,1077n_{43};$
$x_{34} = 1,1903n_{14} - 19,1211n_{24} + 5,99n_{34} + 22,9385n_{44};$
$x_{35} = -19,1211n_{15} + 1,1903n_{25} + 22,9385n_{35} + 5,99n_{45};$
$x_{36} = -19,1211n_{16} + 1,1903n_{26} + 22,9385n_{36} + 5,99n_{46};$
$x_{37} = 31,8897n_{17} - 31,7501n_{27} + 20,0926n_{37} + 1,6177n_{47};$
$x_{38} = 31,8897n_{18} - 31,7501n_{28} + 20,0926n_{38} + 1,6177n_{48};$
$x_{41} = -217,242n_{11} + 13,2814n_{21} + 41,3273n_{31} - 10,2571n_{41};$
$x_{42} = -10,2571n_{12} + 41,3273n_{22} + 13,2814n_{32} - 217,242n_{42};$
$x_{43} = -10,2571n_{13} + 41,3273n_{23} + 13,2814n_{33} - 217,242n_{43};$
$x_{44} = 21,7276n_{14} - 337,3895n_{24} - 11,8544n_{34} + 52,6395n_{44};$
$x_{45} = -337,3895n_{15} + 21,7276n_{25} + 52,6395n_{35} - 11,8544n_{45};$
$x_{46} = -337,3895n_{16} + 21,7276n_{26} + 52,6395n_{36} - 11,8544n_{46};$
$x_{47} = 29,0476n_{17} - 98,7599n_{27} - 7,7370n_{37} + 5,0411n_{47};$
$x_{48} = 29,0476n_{18} - 98,7599n_{28} - 7,7370n_{38} + 5,0411n_{48};$
$x_{51} = -31,9489n_{31} - 15,9425n_{41};$
$x_{52} = -15,9425n_{12} - 31,9489n_{22};$
$x_{53} = -15,9425n_{13} - 31,9489n_{23};$
$x_{54} = -15,9425n_{34} - 47,9233n_{44};$
$x_{55} = -47,9233n_{35} - 15,9425n_{45};$
$x_{56} = -47,9233n_{36} - 15,9425n_{46};$
$x_{57} = -15,9744n_{17} - 15,9425n_{37};$
$x_{58} = -15,9744n_{18} - 15,9425n_{38};$
$x_{71} = 108,6210n_{11} - 6,6407n_{21} - 19,4049n_{31} + 5,7591n_{41};$
$x_{72} = 5,7591n_{12} - 19,4049n_{22} - 6,6407n_{32} + 108,6210n_{42};$
$x_{73} = 5,7591n_{13} - 19,4049n_{23} - 6,6407n_{33} + 108,6210n_{43};$
$x_{74} = -7,2425n_{14} + 112,4632n_{24} + 4,3718n_{34} - 16,2877n_{44};$
$x_{75} = 112,4632n_{15} - 7,2425n_{25} - 16,2877n_{35} + 4,3718n_{45};$
$x_{76} = 112,4632n_{16} - 7,2425n_{26} - 16,2877n_{36} + 4,3718n_{46};$
$x_{77} = -27,7888n_{17} + 98,7599n_{27} + 8,9981n_{37} - 5,0411n_{47};$
$x_{78} = -27,7888n_{18} + 98,7599n_{28} + 8,9981n_{38} - 5,0411n_{48}.$

Для выделения множества инвариантных регуляторов воспользуемся условием

$$\boldsymbol{K}_2^{\perp L}\left(\boldsymbol{K}_\Lambda - \boldsymbol{K}_1\right)\boldsymbol{K}_3^{\perp R} = \boldsymbol{0}. \qquad (32)$$

Подставив в него выражение (27), получаем условие

$$\boldsymbol{K}_2^{\perp L}\left(\boldsymbol{N}\boldsymbol{X}^{-1} - \boldsymbol{K}_1\right)\boldsymbol{K}_3^{\perp R} = \boldsymbol{0}, \qquad (33)$$

которое становится тождеством, например, при

$$n_{21}, n_{33}, n_{14}, n_{25}, n_{26}, n_{47}, n_{48} = 0. \qquad (34)$$

Приведём несколько представителей матриц обратной связи, обеспечивающих инвариантность и заданное расположение полюсов замкнутой системы:

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв},\Lambda} = \begin{pmatrix} 3,58 & -0,4111 & 0,0653 & 0,0171 & -0,0306 & -0,4085 & -0,0323 & -3,1584 \\ 26,2509 & -0,3193 & 0,6196 & 0,005 & -0,2515 & -6,7972 & -0,1943 & -27,4813 \\ -2,8496 & 0,3404 & -0,0916 & 0,0064 & 0,0295 & 0,4738 & 0,0225 & 3,3249 \\ 17,9662 & -2,0808 & -0,5716 & -0,0401 & -0,106 & 6,1971 & -0,3329 & 16,2367 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв},\Lambda} = \begin{pmatrix} 1,6186 & 0,4466 & 0,0158 & 0,0172 & -0,03 & 0,2878 & -0,0231 & -0,5555 \\ 11,365 & -0,7814 & 0,1465 & 0,0062 & -0,0169 & -0,4511 & -0,1387 & -4,5432 \\ -1,1988 & 0,4072 & -0,0313 & 0,0062 & 0,0014 & 0,3157 & 0,0176 & 0,5238 \\ 25,4654 & -0,8941 & 0,1488 & -0,0443 & -0,3497 & 2,2417 & -0,2897 & -11,0414 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв},\Lambda} = \begin{pmatrix} 0,4473 & -0,3764 & -0,0136 & 0,0172 & -0,0003 & 0,4826 & -0,0177 & 0,3344 \\ 2,3221 & -0,2389 & -0,1105 & 0,003 & 0,0085 & 1,3374 & -0,1116 & 3,181 \\ -0,1836 & 0,3463 & 0 & 0,0068 & -0,0018 & -0,5391 & 0,0156 & -0,4111 \\ 30,7791 & -1,2160 & 0,4472 & -0,0277 & -0,3879 & -4,6743 & -0,2366 & -19,723 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{K}_{\text{инв},\Lambda} = \begin{pmatrix} -0,6845 & -0,0524 & -0,0033 & 0,0179 & 0,0017 & 0,4006 & -0,0038 & 0,3849 \\ 0,0257 & -0,05 & 0,0585 & 0,0094 & 0,0065 & 0,0693 & -0,0433 & -0,0177 \\ -0,4377 & 0,0302 & -0,0261 & 0,006 & -0,0002 & -0,3463 & 0,0111 & 0,2331 \\ 0,8579 & 0,0105 & -0,0885 & -0,0363 & -0,3017 & -0,8458 & -0,0872 & -0,423 \end{pmatrix}.$$

Можно проверить, используя любые критерии инвариантности и методы определения собственных значений [3], что линейный закон обратной связи с любой из приведённых матриц коэффициентов действительно обеспечивает инвариантность вертикальной скорости v_y вертолёта и заданное расположение полюсов замкнутой системы, удовлетворяющих требованию инвариантности и устойчивости.

Заключение. Таким образом, синтезированный в данной работе закон управления одновинтового вертолёта решает две задачи: обеспечение инвариантного управления и придание желаемой динамики свободному движению замкнутой системы. Получение данного результата возможно только с использованием множества эквивалентных законов управления и является нетривиальным примером использования этого множества в интересах обеспечения качества управления сложным авиационным объектом.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00046).

Библиографические ссылки

1. **Мисриханов М.Ш.** Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007. 238 с.

2. **Рябченко В.Н.** Сравнение подходов к анализу и синтезу динамических систем // Вестник ИГЭУ, 2001. Вып. 3. С. 170—191.

3. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Анализ и синтез линейных динамических систем на основе ленточных формул // Вестник ИГЭУ, 2005. Вып. 5. С. 243—248.

4. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Алгебраические и матричные методы в теории линейных MIMO-систем // Вестник ИГЭУ. 2005. Вып. 5. С. 196—240.

5. **Зыбин Е.Ю., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Минимальная параметризация решений линейных матричных уравнений. Современные методы управления многосвязными динамическими системами [под ред. А.А. Красовского]. Вып. 2. М.: Энергоатомиздат, 2003. С. 191—202.

УДК 629.7.05

Лян Цин, **Чжан Сяобин**, д-р техн. наук, проф.
(Нанкинский политехнический университет, г. Нанкин, КНР)

zhangxb680504@163.com

НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ БИНС

Построена нелинейная математическая модель погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) при её длительной эксплуатации с большими ошибками скоростей и углов отклонения. Исследованы основные характеристики погрешностей БИНС при различных условиях, разработано программное обеспечение алгоритмов БИНС и других вспомогательных алгоритмов для проверки точности данной модели. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая модель обеспечивает высокую точность при описании характеристики погрешностей БИНС и повышает эффективность комплексного алгоритма при обработке внешней информации.

Ключевые слова: нелинейная модель погрешностей БИНС; большие ошибки скоростей; большие углы отклонения; дополнительное ускорение Кориолиса.

An errors nonlinear mathematical model platform-free inertial navigation system (PFINS) under its long-term operation with high speed and deviation angles errors is developed. The basic characteristics of the PFINS errors at various conditions are investigated, software of the algorithms PFINS and other auxiliary algorithms for this model accuracy is developed. The simulation results show that the proposed model provides high accuracy when description the PFINS errors characteristics and increases the complex algorithm efficiency when processing external information.

Key words: nonlinear model PFINS errors; large speed error; large deflection angles; additional Coriolis acceleration.

Введение и постановка задачи. В настоящее время для определения координат места и параметров движения широко используется бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая является основой навигационных комплексов современных подвижных объектов [1]. Это обусловлено тем, что комплексы дают полную информацию о навигационных параметрах движения: углах курса, тангажа, крена, скоростях движения и координатах объекта. При этом БИНС почти автономна, так как требует минимум внешней информации.

Недостатком БИНС является тенденция к неограниченному увеличению погрешностей выходных данных во времени. С развитием спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS), доплеровского измерителя скорости и сноса (ДИСС), а также системы воздушных сигналов (СВС) компенсация этого недостатка стала возможна. Выходная навигационная информация систем может быть использована для её сопоставления с автономно вычисляемыми в БИНС навигационными данными. С помощью теории фильтрации невязки координат и вектора скорости можно оценить погрешности углов курса, тангаж и крен, а также нескомпенсированные дрейфы датчиков угловой скорости [2].

При построении алгоритмов оптимальной совместной обработки внешней навигационной информации и инерциальных данных следует учитывать комплексную оптимальную обработку информации на основе алгоритмов динамической фильтрации. Реализация этой задачи требует улучшенной математической модели погрешностей БИНС, которая играет важную и основную роль в комплексной обработке [3, 4].

Традиционная модель погрешностей БИНС построена с помощью вариационного метода [5, 6], основное предположение которого заключается в том, что переменные состояния имеют малые значения. После упрощения модель погрешностей представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений. Однако при продолжительной эксплуатации БИНС или отсутствии компенсации внешней информации значение переменной достигает большой величины, что приводит к искажению линейной модели и, в конечном счёте, к ограничению точности комплексной навигационной системы. Этот факт особенно заметен в БИНС на базе микромеханических измерителей.

Данная работа посвящена исследованию нелинейной математической модели погрешностей БИНС, направленному на повышение точности и эффективности работы оценивания и компенсации при комплексной обработке информации. В процессе исследований разработано поддерживающее алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее решить поставленные задачи.

Математическая модель погрешностей БИНС. В качестве параметров ориентации часто используется матрица направляющих косинусов. Девять косинусов углов между шестью осями координат однозначно определяют их взаимную ориентацию. Согласно теореме Эйлера можно определить матрицы направляющих косинусов при переходе от истинной навигационной системы координат (СК) $OX^nY^nZ^n$ к вычислительной навигационной системе координат $OX^cY^cZ^c$. Отклонения между этими системами координат характеризуются углами φ_E, φ_N, φ_U.

Последовательность поворота системы координат можно записать в виде

$$ox_ny_nz_n \xrightarrow[A_1]{\dot{\varphi}_U} ox_1y_1z_1 \xrightarrow[A_2]{\dot{\varphi}_E}$$
$$\xrightarrow[A_2]{\dot{\varphi}_E} ox_2y_2z_2 \xrightarrow[A_3]{\dot{\varphi}_N} ox_cy_cz_c,$$

где A_1, A_2, A_3 — матрицы преобразования соответствующего поворота СК.

Матрица направляющих косинусов имеет вид:

$$C_n^c = \begin{bmatrix} \cos\varphi_N\cos\varphi_U - \sin\varphi_N\sin\varphi_E\sin\varphi_U & \cos\varphi_N\sin\varphi_U - \sin\varphi_N\sin\varphi_E\cos\varphi_U & -\sin\varphi_N\cos\varphi_E \\ -\cos\varphi_E\sin\varphi_U & \cos\varphi_E\cos\varphi_U & \sin\varphi_E \\ \sin\varphi_N\cos\varphi_U + \cos\varphi_N\sin\varphi_E\sin\varphi_U & \sin\varphi_N\sin\varphi_U - \cos\varphi_N\sin\varphi_E\cos\varphi_U & \cos\varphi_N\cos\varphi_E \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица преобразования обозначается C_n^c. Нижний индекс указывает начальную СК, а верхний — конечную. Ниже примем следующие обозначения индексов:

n — истинная навигационная система координат $OX^nY^nZ^n$;

c — вычислительная навигационная система координат $OX^cY^cZ^c$;

e — система координат, связанная с землей $OX^eY^eZ^e$;

b — связанная система координат $OX^bY^bZ^b$.

Для вектора верхний индекс определяет СК задания вектора, а нижний — угловой скорости и характеризует угловую скорость вращения системы координат, обозначающейся вторым индексом, относительно другой СК, обозначающейся первым индексом. Например, СК $OX^cY^cZ^c$ вращается относительно СК $OX^nY^nZ^n$ со скоростью ω_{nc}^c.

Согласно последовательности поворота проекции ω_{nc}^c можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\omega_{nc}^c &= A_3A_2A_1[0\quad 0\quad \dot\varphi_U]^T + \\ &+A_3A_2[\dot\varphi_E\quad 0\quad 0]^T + A_3[0\quad \dot\varphi_N\quad 0]^T = \\ &= \begin{bmatrix}\cos\varphi_N & 0 & -\sin\varphi_N\cos\varphi_E\\ 0 & 1 & \sin\varphi_E\\ \sin\varphi_N & 0 & \cos\varphi_E\cos\varphi_N\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot\varphi_E\\ \dot\varphi_N\\ \dot\varphi_U\end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{2}$$

В алгоритме БИНС идеальное матричное дифференциальное уравнение Пуассона имеет вид [7]:

$$\dot C_b^n = C_b^n[\omega_{ib}^b(\text{true})] - [\omega_{in}^n(\text{true})]C_b^n, \tag{3}$$

где оператор $[\omega]$ определяется следующим образом:

$$[\omega] = \begin{bmatrix}0 & -\omega_z & \omega_y\\ \omega_z & 0 & -\omega_x\\ -\omega_y & \omega_x & 0\end{bmatrix};$$

$$\omega = \begin{bmatrix}\omega_x & \omega_y & \omega_z\end{bmatrix}^T.$$

Данным уравнением характеризуется изменение истинных навигационных параметров. Однако реально уравнение Пуассона решается ЭВМ в вычислительной навигационной системе координат $OX^cY^cZ^c$ с использованием параметров погрешностей:

$$\dot C_b^c = C_b^c[\omega_{ib}^b] - [\omega_{in}^n]C_b^c, \tag{4}$$

где $\omega_{ib}^b = \omega_{ib}^b(\text{true}) + \varepsilon^b$; ε^b — погрешности гироскопа.

Поскольку $\dot C_b^c = \dot C_n^c C_b^n = \dot C_n^c C_b^n + C_n^c \dot C_b^n$, подставляем равенство (3) в уравнение (4) и получаем:

$$\begin{aligned}&\dot C_n^c C_b^n + C_n^c(C_b^n[\omega_{ib}^b(\text{true})] - [\omega_{in}^n(\text{true})]C_b^n) = \\ &= C_b^c[\omega_{ib}^b(\text{true}) + \varepsilon^b] - [\omega_{in}^n]C_b^c \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot C_n^c C_b^n = C_n^c[\omega_{in}^n(\text{true})]C_b^n - [\omega_{in}^n]C_b^c + C_b^c[\varepsilon^b] \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot C_n^c = C_n^c[\omega_{in}^n(\text{true})] - [\omega_{in}^n - C_b^c\varepsilon^b]C_n^c \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot C_n^c = C_n^c[\omega_{in}^n(\text{true})] - [\omega_{ic}^c]C_n^c,\end{aligned} \tag{5}$$

где $\omega_{ic}^c = \omega_{in}^n - C_b^c\varepsilon^b$.

Из уравнения (5) видно, что абсолютная угловая скорость вычислительной навигационной СК $OX^cY^cZ^c$ ω_{ic}^c не равна угловой скорости истинной навигационной СК $OX^nY^nZ^n$ $\omega_{in}^n(\text{true})$. Это приведёт к относительному повороту между двумя системами координат, например колебание с периодом Шулера. Отсюда можно получить относительную угловую скорость ω_{nc}^c:

$$\begin{aligned}&\omega_{nc}^c = \omega_{ic}^c - C_n^c\omega_{in}^n(\text{true}) = \\ &= \omega_{in}^n - C_n^c\omega_{in}^n(\text{true}) - C_b^c\varepsilon^b = \\ &= \begin{bmatrix}-\dfrac{V_N^c}{R}\\ \omega_e\cos\varphi + \dfrac{V_E^c}{R}\\ \omega_e\sin\varphi + \dfrac{V_E^c}{R}\text{tg}\varphi\end{bmatrix} - C_n^c\begin{bmatrix}-\dfrac{V_N^n}{R}\\ \omega_e\cos\varphi + \dfrac{V_E^n}{R}\\ \omega_e\sin\varphi + \dfrac{V_E^n}{R}\text{tg}\varphi\end{bmatrix} - \\ &-C_b^c\varepsilon^b = (I - C_n^c)\omega_{ie}^n + BV^c - C_n^cBV^n(\text{true}) - C_b^c\varepsilon^b,\end{aligned} \tag{6}$$

где матрица $B = [0\ -1/R\ 0;\ 1/R\ 0\ 0;\ \text{tg}\varphi/R\ 0\ 0]$; $R = R_e + h$; R_e — радиус Земли; h — высота; φ — широта.

В данной модели различии между истинной и вычислительной широтой игнорируются.

Уравнения (2) и (6) характеризуют погрешности углов отклонения БИНС.

Основное навигационное уравнение имеет вид [7]:

$$\dot V^n = f^n - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^n + g^n. \tag{7}$$

При решении уравнения (7) в навигационном компьютере используются измерительные данные датчиков, содержащих погрешности. В этом случае вместо истинной навигационной системы координат $OX^nY^nZ^n$ используется вычислительная навигационная система координат $OX^cY^cZ^c$. Тогда уравнение (7) имеет вид:

$$\dot V^c = f^c - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + g^n, \tag{8}$$

где $f^c = C_b^c f^b = C_b^c(a(\text{true}) - g^b + \nabla^b)$; ∇^b — погрешности акселерометра.

$$\begin{aligned}\dot{V}^c &= f^c - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + g^n = \\ &= C_b^c(a(\text{true}) - g^b) + C_b^c\nabla^b - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + g^n = \\ &= C_n^c f^n(\text{true}) - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + g^n + C_b^c\nabla^b = \\ &= C_n^c(\dot{V}^n(\text{true}) + (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)(\text{true})\times V^n(\text{true}) - g^n) - \\ &-(\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + g^n + C_b^c\nabla^b. \end{aligned} \quad (9)$$

Векторы V^c и V^n(true) находятся не в одной системе координат, поэтому нельзя непосредственно проводить операцию вычитания. Их отношение имеет вид:

$$\begin{cases} V^c = C_n^c V^n(\text{true}) + \Delta V^c \\ \dot{V}^c = \dot{C}_n^c V^n(\text{true}) + C_n^c \dot{V}^n(\text{true}) + \Delta\dot{V}^c \end{cases} \text{ или}$$

$$\begin{cases} V^n = C_c^n V^n(\text{true}) - \Delta V^n \\ \dot{V}^n = \dot{C}_c^n V^c(\text{true}) + C_c^n \dot{V}^c(\text{true}) - \Delta\dot{V}^n. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в уравнение (9), получим:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{V}^c &= -\dot{C}_n^c V^n(\text{true}) + C_n^c(\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)(\text{true})\times \\ &\times V^n(\text{true}) - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n)\times V^c + \\ &+ g^n - C_n^c g^n + C_b^c\nabla^b. \end{aligned} \quad (11)$$

Преобразуя уравнения к общему виду, получим

$$\begin{aligned}\Delta\dot{V}^c &= [C_b^c\varepsilon^b - \omega_{in}^n - C_n^c\omega_{ie}^n(\text{true})]\Delta V^c + \\ &+ [\omega_{ie}^n - C_b^c\varepsilon^b - C_n^c\omega_{ie}^n(\text{true})]V^c + \\ &+ (I - C_n^c)g^n + C_b^c\nabla^b. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнения (2), (6) и (12) составляют математическую модель погрешностей БИНС:

$$\begin{cases} \Delta\dot{V}^c = [C_b^c\varepsilon^b - \omega_{in}^n - C_n^c\omega_{ie}^n]\Delta V^c - \\ - [C_b^c\varepsilon^b + \omega_{ie}^n - C_n^c\omega_{ie}^n]V^c + \\ + (I - C_n^c)g^n + C_b^c\nabla^b; \\ \omega_{nc}^c = C_n^c B C_c^n \Delta V^c + (B - C_n^c B C_c^n)V^c + \\ + (I - C_n^c)\omega_{ie}^n - C_b^c\varepsilon^b. \end{cases} \quad (13)$$

Данная модель является нелинейной, так как имеет тригонометрические функции и операции умножения между переменными. Модель можно реализовать в программном комплексе, а также рассчитывать и анализировать характеристики погрешности БИНС при изменении параметров. Отметим, что ΔV^c равняется разности V^c и $C_n^c V^n$(true) (в частности, $C_n^c V^n(\text{true}) = C_b^c V^b(\text{true}) = V^c(\text{true})$. В конкретном случае ΔV^c можно непосредственно получить при компенсации информации от ДИСС или СВС. Обычно ДИСС и СВС определяют проекции скорости объекта на оси связанной СК $OX^bY^bZ^b$. Поскольку матрица C_b^c известна, то можно найти представление скорости V^b(true) в вычислительной СК $OX^cY^cZ^c$ и получить ΔV^c. А при компенсации информации от GPS уравнение измерения будет иметь нелинейный вид, так как оно содержит матрицу C_n^c. При этом необходимо создать алгоритм компенсации с помощью нелинейной теории фильтрации. Рассмотрим основные свойства и особенности предложенной нелинейной модели.

Первое уравнение модели является основным уравнением погрешностей БИНС, характеризующим изменения погрешностей скорости. Из правой части уравнения (11) видно, что на погрешность скорости влияют четыре компонента.

Первая часть уравнения является произведением матрицы $\dot{C}_n^c$ на истинную скорость со знаком минус. При эксплуатации БИНС все расчёты проводятся в вычислительной СК $OX^cY^cZ^c$. Из-за ошибок датчиков вычислительная навигационная СК вращается относительно истинной навигационной СК $OX^nY^nZ^n$ с угловой скорости ω_{nc}^c. Тогда при вычислении скорости в СК $OX^cY^cZ^c$ возникает дополнительное ускорение, которое аналогично ускорению Кориолиса, поэтому первый компонент можно записать в виде ускорения Кориолиса. Подставляя равенство $C_n^c = C_n^c\left[\omega_{cn}^n\right] = -C_n^c\left[\omega_{nc}^n\right]$ в первый компонент, получим:

$$\begin{aligned}-\dot{C}_n^c V^n(\text{true}) &= C_n^c[\omega_{nc}^n]V^n(\text{true}) = \\ &= C_n^c\omega_{nc}^n \times V^n(\text{true}). \end{aligned}$$

Вторая часть уравнения представляет собой разность ускорения Кориолиса. По большому счёту, она имеет малую величину. Третья часть уравнения является проекцией ускорения силы тяжести на соответствующую ось СК $OX^cY^cZ^c$. Этот член уравнения возникает из-за углов отклонения между истинной и вычислительной навигационной СК и может приводить к колебанию платформы с периодом Шулера. Последний член уравнения показывает влияние погрешностей акселерометров.

В большинстве случаев второй член меньше, чем остальные из-за разности ускорения Кориолиса и малой угловой скорости навигационной СК. Однако первый член значительно влияет на направление скорости, особенно БИНС на базе микромеханических гироскопов (ММГ). При приближённой оценке угловая скорость ω_{nc}^c равна смещению нуля гироскопа. Полагаем, что истинная скорость равна 10 м/с. В данном случае дополнительное ускорение и погрешность акселерометра будут иметь одинаковый порядок. Чем больше скорость объекта, тем выше влияние.

В точной навигационной системе угловая скорость ω_{nc}^{c} очень мала, и ускорение Кориолиса незначительно влияет на направление скорости. Однако в навигационной системе на базе ММГ ω_{nc}^{c} имеет относительно большую величину по сравнению с абсолютной угловой скоростью навигационной СК. В результате дополнительное ускорение Кориолиса будет изменять направление скорости, и в реальной системе этот компонент необходимо оценивать и компенсировать.

Качественный анализ нелинейной модели позволяет перейти к количественным оценкам. Компьютерные эксперименты проводятся с помощью разработанного программного комплекса в среде Simulink.

Компьютерные эксперименты и анализ результатов. Для проверки работоспособности построенной модели выполнены серии компьютерных экспериментов в среде Simulink. Программное обеспечение включает: блок генератора исходных полётных данных, инерциальный измерительный блок, блок БИНС и данной нелинейной модели.

Блок генератора исходных полётных данных. По кинетическому отношению можно получить линейные ускорения и угловые скорости движения летательного аппарата (ЛА) в инерциальной системе. В качестве истинных величин эта информация подаётся на датчики гироскопов и акселерометров. Согласно методу формирования полётных данных [8], полётная траектория и углы ориентации ЛА имеют вид:

$$\begin{cases} \varphi = 45^\circ + 3^\circ \cos(\omega_1 t) \\ \lambda = 120^\circ + 3^\circ \cos(\omega_2 t); \\ h = 3000m \end{cases} \quad \begin{cases} \vartheta = 5^\circ \cos(\omega t) \\ \gamma = 5^\circ \cos(\omega t) \\ \psi = 5^\circ \cos(\omega t) \end{cases},$$

где φ — широта; λ — долгота; h — высота; $\omega_1 = \omega_2 = 2\pi/7200$ — частота повторной траектории; ϑ — угол тангажа; γ — угол крена; ψ — угол курса; $\omega = 2\pi/10$ — частота углового движения.

На рис. 1 представлена траектория ЛА относительно Земли.

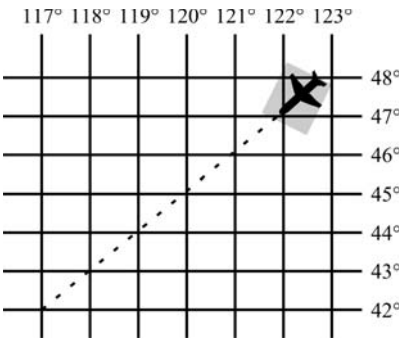


Рис. 1. Заданная полётная траектория ЛА в северном полушарии

Инерциальный измерительный блок. В блоке инерциальной измерительной модели (ИИМ) применяется несложная математическая модель. Параметры моделирования соответствуют данным микромеханического датчика фирмы AnalogDevices марки ADIS16354 [8]. Основные параметры ADIS16354 приведены в таблице.

Параметры моделирования ИИМ

Смещение нуля акселерометра, м/с^2	0,020
Смещение нуля гироскопа, рад/с	0,0025
Случайное блуждание скорости, $m/s/\sqrt{h}$	0,135
Случайное блуждание угла, $^\circ/\sqrt{h}$	4,2

Блок БИНС. Метод кватерниона широко применяется в прикладном алгоритме БИНС [9]. С помощью кватерниона можно создать более эффективный дискретный вычислительный блок, который является главной частью БИНС. Блок БИНС включает в себя блоки: предварительной обработки, определения местоположения и ориентации. В блоке предварительной обработки реализуются гребная и коническая компенсация (sculling and coning compensation). После компенсации сигналы ИИМ подаются БИНС, где вычисляются параметры навигации. В данном блоке вертикальный канал не учитывается.

Блок нелинейной модели погрешностей. В блоке происходит сравнение истинных погрешностей и погрешностей из предлагаемой модели в соответствии с системой уравнения (13).

Для анализа работоспособности предлагаемой модели при различных условиях проведено три эксперимента. В первом эксперименте погрешности датчиков равны нулю, период эксплуатации выбран 84 мин. Начальный угол отклонения $\varphi_U = -20^\circ$. Данный эксперимент проведён для определения применимости модели при условии большого угла отклонения и для проверки основной характеристики погрешности. Во втором эксперименте применяется модель микромеханической ИИМ. Известно, что погрешности БИНС на базе микромеханической ИИМ увеличиваются очень быстро, и система не может долго самостоятельно работать. В связи с этим выбран период эксплуатации продолжительностью 5 мин.

В третьем эксперименте были разработаны алгоритмы нелинейного сигма-точечного фильтра Калмана [10] (*Unscented Kalmanfilter — UKF*) на основе предлагаемой модели. Эксперимент предназначен для выполнения задачи выставки. Благодаря тому, что применение модели неограничено по величине переменной, возможно од-

новременно совершать грубую и точную выставку. В качестве вектора состояния выберем $x = \left[\Delta V_E^c, \Delta V_N^c, \Delta V_U^c, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \varepsilon_E, \varepsilon_N, \varepsilon_U\right]^T$, где

ε_E, ε_N, ε_U — погрешности гироскопа в вычислительной СК $OX^cY^cZ^c$.

Уравнения измерения имеют вид:

$$y(t) = [\Delta V_E^c, \Delta V_N^c, \Delta V_U^c]^T + \nu(t).$$

В том числе $\Delta V^c = V^c - C_n^c V^n(\text{true}) = V^c$ при выставке. В данном эксперименте начальные углы $\varphi_{E0} = 50°$, $\varphi_{N0} = 60°$, $\varphi_{U0} = 20°$, время моделирования — 60 с. Частота компенсации — 10 Гц.

По результатам моделирования первого эксперимента построены характеристики сравнения ошибок скоростей и углов отклонения с истинными величинами (рис. 2, *а*, *б*), а на рис. 3, *а*, *б* — по результатам второго эксперимента.

Из графиков видно, что при больших ошибках скоростей и углов отклонения, истинные погрешности ΔV_E, ΔV_N, φ_E, φ_N, φ_U всегда совпадают с вычислительными погрешностями модели, а их относительные погрешности очень малы. Отметим, что погрешности ΔV_E, ΔV_N, φ_E, φ_N, φ_U изменяются с периодом Шулера. Это означает, что в БИНС на базе точных датчиков погрешности Шулера занимают важное место и являются главными по сравнению с остальными погрешностями.

Анализ рис. 3 показал, что, во-первых, погрешности БИНС на базе микромеханических измерителей увеличиваются очень быстро и достаточно большие. Следовательно, для обеспечения точности навигации необходимо обязательно требовать компенсации внешней информации. Во-вторых, истинные погрешности ΔV_E, ΔV_N, φ_E, φ_N, φ_U совпадают с вычислительными погрешностями нелинейной модели. В том числе максимальная относительная погрешность не превышает 0,35 % погрешностей скоростей и 0,03 % углов отклонения.

Эти ошибки вызваны следующими причинами: во-первых, из модели видно, что погрешность вертикальной скорости влияет на прочие каналы. Однако в блоке БИНС вертикальный канал не учитывается, а вертикальная скорость установлена нулевой. Во-вторых, в данной нелинейной модели различия между истинной и вычислительной широтой игнорируются.

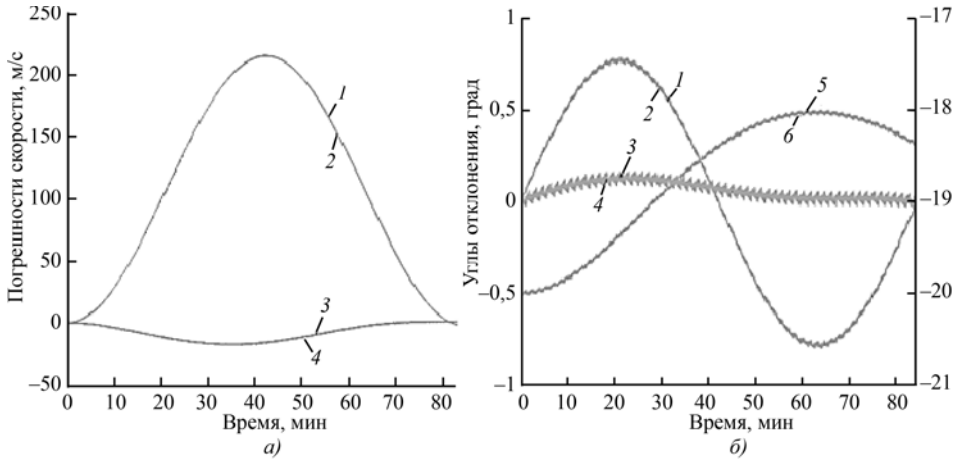


Рис. 2. Характеристики сравнения скоростей (*а*) и углов отклонения (*б*) с истинными величинами по результатам первого эксперимента:

а — *1*, *3* — истинные ошибки ΔV_E(true), ΔV_N(true); *2*, *4* — ошибки скоростей ΔV_E, ΔV_N нелинейной модели; *б* — *1*, *3*, *5* — истинные погрешности φ_E(true), φ_N(true), φ_U(true); *2*, *4*, *6* — погрешности углов отклонения φ_E, φ_N, φ_U из нелинейной модели, в том числе линии *5*, *6* по правой оси *y*

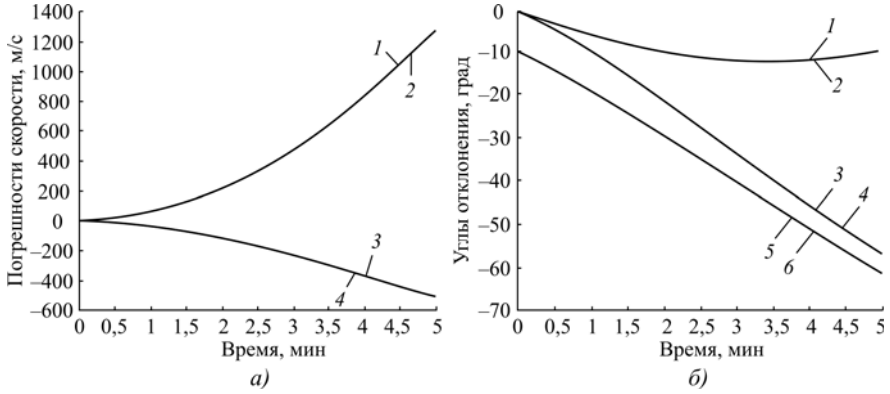


Рис. 3. Характеристики сравнения ошибок скоростей (*а*) и углов отклонения (*б*) с истинными величинами по результатам второго эксперимента:

а — *1*, *3* — истинные ошибки ΔV_E(true), ΔV_N(true); *2*, *4* — ошибки скоростей ΔV_E, ΔV_N нелинейной модели; *б* — *1*, *3*, *5* — истинные погрешности φ_E(true), φ_N(true), φ_U(true); *2*, *4*, *6* — погрешности углов отклонения φ_E, φ_N, φ_U нелинейной модели

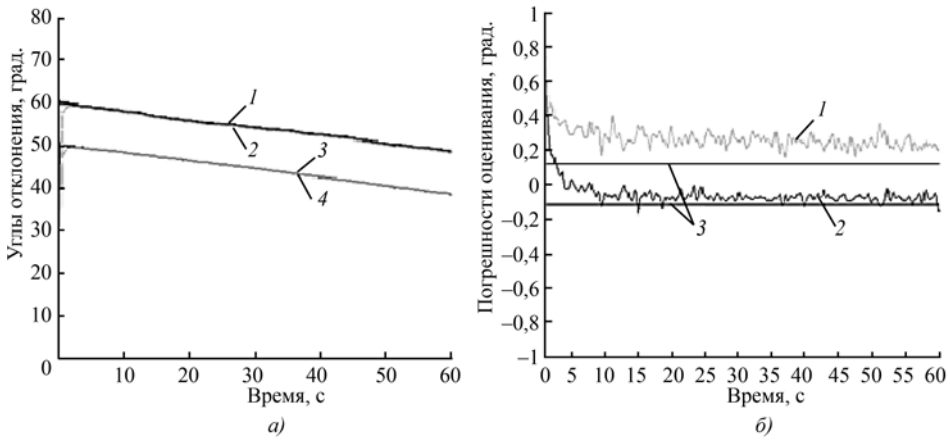


Рис. 4. Характеристики углов отклонения φ_N, φ_E и погрешности оценивания углов по результатам третьего эксперимента:
а — 1, 3 — истинные углы φ_N(true), φ_E(true); *2, 4* — углы оценивания φ_N, φ_E; *б — 1, 2* — погрешности оценивания φ_N, φ_E; *3* — предельная точность выставки БИНС в горизонтальной плоскости

Углы отклонения и их оценки представлены на рис. 4.

Из рис. 4, *а* видно, что при больших начальных углах φ_{N0}, φ_{E0} алгоритмы выставки на основе данной модели одновременно выполняют задачу грубой и точной выставки. На рис. 4, *б* показано, что погрешности оценивания углов быстро стремятся к предельному значению, которое определяется нестабильностью погрешности акселерометра при запуске.

Приведённые результаты моделирования показали, что предлагаемая нелинейная модель может точно описать изменения погрешностей БИНС при длительной эксплуатации и формировать сигналы коррекции, обеспечивающие точность навигации при комплексном учёте внешней информации.

Заключение. Исследованы теоретические и прикладные аспекты анализа погрешностей БИНС, предназначенного для точного описания характеристики погрешностей БИНС при продолжительной эксплуатации:

1. Построена и исследована математическая модель погрешностей БИНС, проведён анализ влияния главных частей модели.

2. Математическая модель погрешностей БИНС характеризуется системой нелинейных дифференциальных уравнений. Кроме параметров погрешностей датчиков, все параметры уравнения известны или определяются вычислительными навигационными данными.

3. Показаны характеристики погрешностей БИНС при начальном условии $\varphi_U = -20°$. Анализируется период изменения погрешности. Приведена точность данной модели при условии больших углов отклонения.

4. Показаны результаты моделирования погрешностей БИНС на базе микромеханических измерителей, и высокая точность данной модели при описании характеристики погрешности БИНС при длительной эксплуатации.

5. Выполнена задача горизонтальной выставки БИНС с помощью сигма-точечного фильтра Калмана (Unscented KF). Показаны эффективность и точность данной модели в условиях больших начальных углов выставки.

Библиографические ссылки

1. **Titterton D.H., Weston J.L.** Strapdown inertial navigation technology, 2nd Ed. The Institution of Electrical Engineers, 2004. P. 249—256.

2. **Бабич О.А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.

3. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2010. 417 с.

4. **Fang Ke, Proletarsky A., Neusipin K.** Selection of Measured Signals in the Navigation Measuring Complex // Journal of Measurement Science and Instrumentation. December, 2011.04. V. 02. P. 346—348.

5. **Матвеев В.В.** Инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 199 с.

6. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

7. **Zhao H., Zhao Z., Long G.** Flight track data creation and inertial component simulation the strapdown INS // Journal of System Simulation, 2005. V. 17. No. 5. P. 1026—1029.

8. **Analog** Devices IMU ADIS16354. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16354.pdf (дата обращения 5 сентября 2013 г.).

9. **Salychev O.** Applied inertial navigation: problems and solutions. M.: BMSTU Press, 2004. P. 562.

10. **Julier S.J., Uhlmann J.K.** Unscented filtering and nonlinear estimation // Proceedings of the IEEE. 2004. No. 92. P. 401—422.

УДК 535.015, 535.3, 53.07

В.О. Гладышев, д-р физ.-мат. наук, **П.С. Тиунов**, канд. физ.-мат. наук,
Д.И. Портнов, **А.А. Терешин**, **Т.М. Гладышева**, канд. тех. наук,
М.Б. Челноков, канд. физ.-мат. наук, **Д.Д. Базлева**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

vgladyshev@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ОПТИКИ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

Приведено описание экспериментального измерительного стенда для проведения современных тестов электродинамики движущихся сред. Прецизионный лазерный двухлучевой интерферометр содержит оптический диск, скорость вращения которого изменяется в диапазоне 2—400 Гц. Установка управляется в автоматическом режиме, включая многоканальный сбор данных, их параллельную обработку и визуализацию результатов измерений.

Ключевые слова: лазерный интерферометр; электродинамика подвижных сред; эффект Физо; обработка данных; программный комплекс.

The description of the experimental measuring stand for modern test carrying out of the moving media electrodynamics is adduced. Precision laser dual-beam interferometer comprises optical disk which rotational speed changes in the range of 2—400 Hz. Installation is automatic controlled, including multi-channel data collection, data parallel processing and visualization of measurment results.

Key words: laser interferometer; electrodynamics of moving media; Fizeau effect; data processing; software package.

Введение. Теоретические и экспериментальные основы электродинамики движущихся сред были заложены в XIX столетии [1—5] и развиты в работах [6—10].

Теоретическое описание эффектов оптики движущихся сред, таких как эффекты Саньяка, Физо, Доплера, Ферми, основано на использовании координатного решения дисперсионного уравнения. В общем случае от скорости движения сред и их границ раздела зависят все характеристики электромагнитного излучения.

Эксперименты по проверке следствий электродинамики движущихся сред, как правило, имеют первый порядок точности, т.е. соответствуют точности решения дисперсионного уравнения при ограничении членами порядка v/c, где v — скорость движения среды или границы раздела сред, c — скорость света в вакууме.

Математическое моделирование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с движущейся средой указывает на необходимость применения аппарата электродинамики движущихся сред в задачах лазерной локации, при когерентной передаче данных между орбитальными аппаратами и наземными станциями, в космической навигации. Это приводит к необходимости поиска новых схем для изучения эффектов оптики движущихся сред, повышения уровня точности и помехозащищённости.

В качестве примера современных исследований в этой области можно указать на опыты, выполненные с использованием кольцевого интерферометра и в экспериментах с оптическим световодом в кольцевом резонаторе, а также с движущейся плазмой [11—15].

Для более детального изучения процессов распространения электромагнитного излучения в среде с трёхмерным законом движения были предложены схемы с вращающимся оптическим диском [16—19], создан прецизионный лазерный интерферометр для изучения эффектов оптики движущихся сред [20], обнаружено явление поворота плоскости поляризации электромагнитного излучения во вращающемся оптическом диске [21, 22].

Повышение точности исследований неизбежно приводит к увеличению объёмов экспериментальных данных, использованию компьютерных методов обработки информации, автоматизации сбора и обработки больших массивов данных. Решение этих проблем стало возможным благодаря появлению новой элементной базы, использованию высокоскоростных, многоканальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) высокой разрядности и объёмом буферизации, применению современных технологий параллельной обработки данных.

Данная работа посвящена созданию автоматизированного лабораторного измерительного

стенда для изучения процессов распространения электромагнитного излучения в движущихся средах.

Описание лабораторного измерительного стенда. В движущейся среде траектория волнового вектора электромагнитной волны зависит от трёхмерного поля скоростей среды, что можно исследовать на современном уровне точности. В нерелятивистском пределе ожидаемый сдвиг интерференционной картины вследствие продольного эффекта увлечения Физо запишется в виде

$$\Delta_0 = \frac{\omega r d(n_2^2 - 1)}{\lambda c} \operatorname{tg}\vartheta_2, \qquad (1)$$

где ω — угловая скорость вращения диска; r — прицельный параметр; d — толщина диска; n_2 — показатель преломления; λ — длина волны излучения; ϑ_2 — угол преломления.

Однако в движущейся среде происходит отклонение от закона Снеллиуса, и угол преломления необходимо определять из выражения

$$\vartheta_2' = \operatorname{arctg} \frac{\sin\vartheta_0}{-k_2\beta_{2z} + \sqrt{\cos^2\vartheta_0 + k_2}}, \qquad (2)$$

где ϑ_0 — угол падения излучения на границу раздела двух сред; $k_2 = n_2^2 - 1$; $\beta_{2z} = u_{2z}/c$; u_{2z} — нормальная к границе раздела сред составляющая скорости движения среды.

Для изучения трёхмерного эффекта Физо, а также других эффектов оптики движущихся сред была использована схема прецизионного лазерного интерферометра, обладающего разностными компенсирующими свойствами [13].

В схеме малый сдвиг одного из оптических элементов одинаково влияет на оба луча, что не влияет на положение интерференционной картины (рис. 1). Эта схема позволила минимизировать собственный механический шум, влияние сейсмических и акустических колебаний, влияние тепловых источников.

В интерферометре луч от лазера L разделяется светоделителем BS_1 на два. Первый отражённый луч попадает в фотодиод *PDi* для контроля мощности лазера. Второй разделяется на два луча светоделителем BS_2, которые после зеркал *M1* и *M2* проходят вращающийся оптический диск в противоположных направлениях. Вследствие вращения оптического диска *OD* один из лучей получает положительный сдвиг фазы, другой — отрицательный. Затем лучи смешиваются на светоделителе *BS* и после зеркала *M3* и оптической системы *OS* попадают на фотодетектор *PD*. Смещение интерференционной картины определялось по изменению времени следования интерференционных полос по апертуре фотодетектора *PD*.

В созданном стенде диаметр диска 62 мм, толщина — 10 мм. Длина волны лазера $\lambda = 0{,}6329910 \pm 1\cdot10^{-7}$ мкм, мощность — 2 мВт. Проекция оптического пути в диске на его плоскую поверхность равна 41 мм. Показатель преломления диска $n = 1{,}72$, клин — 2″. Для данных параметров диска и лазера при частоте вращения $\nu = 100$ Гц ожидаемое смещение полос вследствие эффекта Физо $\Delta_0' = 2{,}16\cdot10^{-2}$ полосы.

На стенде использовался гелий-неоновый лазер ЛГН 302 мощностью 0,7 мВт в каждой из двух линейно ортогональных поляризованных компонент.

Вращение оптического диска обеспечивалось трёхфазным асинхронным двигателем под управлением цифрового преобразователя частоты Delta Electronics VFD-EL, позволяющим изменять частоту вращения в пределах 2—400 Гц. Исполнительный механизм, осуществляющий поворот установки в горизонтальной плоскости, содержит шаговый двигатель.

Световой поток на выходе регистрируется высокоскоростным PIN-фотодиодом S5821-01 (*Hamamatsu*) с полосовым предусилителем.

Поляризация, прошедшего через оптический диск лазерного излучения, определялась независимо с помощью призмы Глана—Тейлора и плёночного поляризатора.

Первичное преобразование сигналов осуществлялось АЦП National Instruments PCI-6024 при входном разрешении 12 разрядов и PCI-6132, имеющем частоту оцифровки сиг-

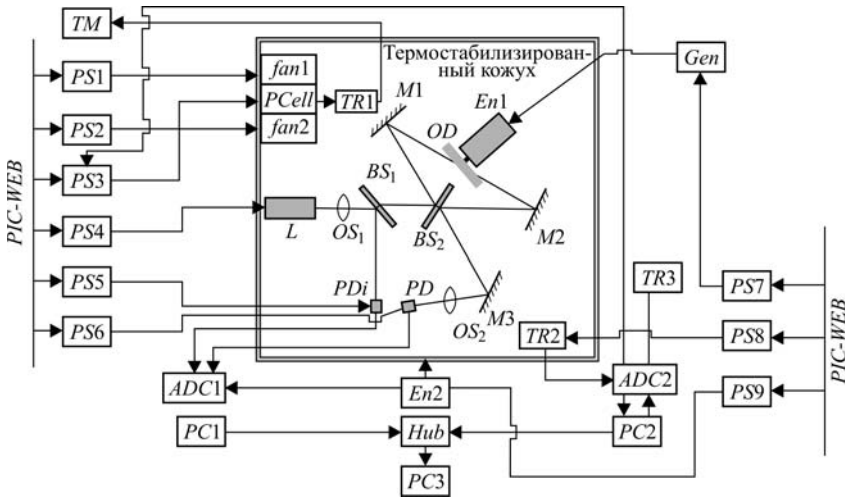


Рис. 1. Функциональная схема дискового интерферометра

нала 2,5 МГц при входном разрешении 14 разрядов на канал.

Для управления и сбора данных с интерферометра создан автоматизированный оптико-электронный стенд (см. рис. 1), в состав которого входят девять блоков питания *PS1—PS9*, которые обеспечивают работоспособность входящих в установку элементов. Все источники питания включаются и выключаются при помощи платы *PIC-WEB*.

Установка закрыта термостабилизированным кожухом, внутри которого расположены элементы интерферометра, система охлаждения, состоящая из двух вентиляторов *fan1* и *fan2*, а также ячейка Плетье *PCell*. Ячейка Плетье управляется АЦП *ADC2*, на который поступает сигнал с компьютера при нарушении температурного режима внутри объёма, заключённого под кожухом.

Температура на ячейке Плетье измеряется терморезистором *TR1*, показания с которого можно вывести на цифровой измеритель температуры *TM*. Также внутри установки расположен второй терморезистор *TR2*, с помощью которого измеряется температура в объёме, заключённом под кожухом. Полученные данные поступают на *ADC2* и далее — на компьютер *PC2*.

Ко второму АЦП *ADC2* также подключён внешний терморезистор *TR3* для измерения температуры снаружи кожуха, а полученные данные записываются на компьютере *PC2*.

Кроме этого, показания снимаются с фотодиода *PDi* и фотодетектора *PD*, затем они поступают на АЦП *ADC1*, который, в свою очередь, сбрасывает полученные данные на компьютер *PC1*.

Вся установка расположена на поворотном столе, вращающемся шаговым мотором *En2*, который управляется АЦП *ADC1* и компьютером *PC1*.

При помощи цифрового генератора *Gen* осуществляется управление частотой вращения гиромотора *En1*, к которому присоединён оптический диск *OD*.

После обработки всех данных компьютерами *PC1* и *PC2* результаты вычислений через *Hub* сбрасываются на *PC3* для проведения окончательных расчётов.

Программное управление стендом реализовано в среде *LabView*. Управляющая аппаратура контролирует включение/выключение следующих элементов установки: лазера, системы охлаждения интерферометра (блок питания ячейки Пельтье и вентиляторы), блока управления шаговым двигателем (отвечает за вращение интерферометра), блоков питания фотодетекторов и термопары, цифрового блока питания гиромотора с оптическим диском.

Для реализации удалённого доступа к управляющему ПК использовано программное обеспечение *Hamachi*, при помощи которого можно осуществить *VPN* защищённое соединение между несколькими компьютерами через интернет. Построенная таким образом сеть аналогична одной физической локальной сети.

Также контролировались температура и питание оборудования интерферометра (рис. 2). Для этого была разработана функциональная и электронная схемы управления. Для включения и выключения системы охлаждения использовались герконовые реле, а для остальных систем — электромагнитные.

Ввиду того, что амплитуда напряжения управляющего сигнала должна быть примерно 15 В, для усиления сигнала с аналогового выхода АЦП использовались транзисторы КТ315 (VT_1). При подаче напряжения с АЦП реле K_1, K_2, K_3 замыкают цепь. Также в изображенной на рис. 2 схеме использовались два сопротивления R_1 и R_2 и диод VD_1.

Поскольку изменение температуры внутри интерферометра существенно влияет на лазерное излучение, оптические элементы установки и в конечном итоге на результаты измерений, была разработана система контроля температуры.

В качестве охлаждающего элемента используется ячейка Пельтье, при помощи которой поддерживается внутренняя температура интерферометра в заданном интервале.

Показания температуры внутри установки снимаются с терморезистора на АЦП. В зависимости от снятой температуры и того, попадает ли она в допустимый диапазон или нет, включается или выключается ячейка Пельтье.

Для автоматизированного управления интерферометрическим измерительным комплексом использована плата PIC-WEB, которая является отладочной платой аппаратного Web-сервера на базе микроконтроллера производства MICROCHIP. Данная плата обладает рядом особен-

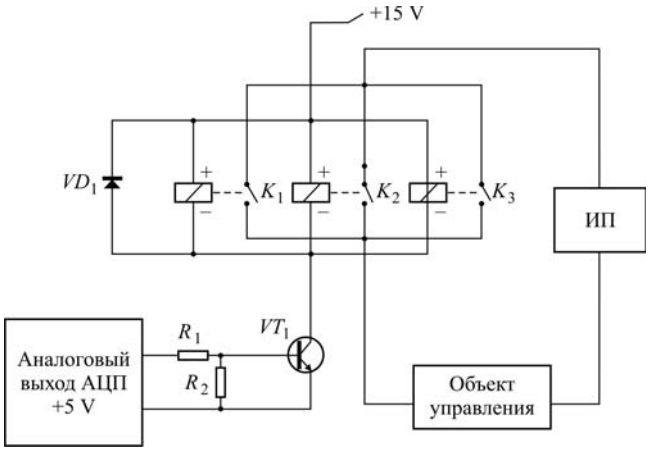


Рис. 2. Функциональная схема управляющих элементов системы контроля температуры и питания оборудования интерферометра

ностей: на ней установлены микроконтроллер PIC18F452, Ethernet-контроллер ENC28J60, 1 Мбит памяти для размещения Web-страниц, потенциометр на аналоговом входе, датчик температуры.

Питание PIC-WEB осуществляется при помощи источника питания напряжением 9—12 В и постоянным током либо источника питания с напряжением 6—9 В и переменным током. Потребляемый ток составляет 130 мА. На плате используются два кварцевых кристалла с частотами 10 МГц и 32,76 КГц.

Плата PIC-WEB позволяет удалённо контролировать включение/выключение всех элементов установки через Web-интерфейс.

Для управления электропитанием элементов интерферометра используется реле РЭН34, которое является герметичным, двухпозиционным, одностабильным, с двумя переключающими контактами и предназначено для коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока частотой от 50 до 1100 Гц. Данное реле соответствует требованиям ГОСТ 16121—86 и техническим условиям эксплуатации ХПО.450.000ТУ.

Для управления термосистемой выбрано реле РЭС-44 постоянного тока, которое является электромагнитным, слаботочным, неполяризованным, герконовым и соответствует техническим условиям эксплуатации КЩО.450.014.

Поскольку управляющий сигнал, приходящий с платы, равен 5 В, а напряжение срабатывания реле составляет не менее 10 В, для усиления управляющего сигнала используются транзисторы КТ829.

Фактически калибровку интерферометра можно разделить на два этапа: калибровка самого интерферометра и калибровка терморезистора.

Сначала проводится двумерное сканирование интерференционных полос, что позволяет определить зависимость абсолютной ошибки определения положения интерференционной картины от того, в какой области интерференционной полосы (ИП) проводятся измерения.

Смещение интерференционной картины определяется по изменению временного спектра в сигнале на фотодетекторе, образующемся при следовании интерференционных полос по апертуре фотодетектора.

Данные о температуре с терморезистора внутри интерферометра получают в виде напряжения в вольтах. Для перевода температуры в градусы Цельсия была проведена калибровка датчика. Для этого одновременно измеряется температура объекта термопарой и электронным термометром с точностью до 0,1 °С. Температура снимается в обычном и нагретом состояниях, чтобы провести линейную аппроксимацию по зависимости $T = kU + b$, где T — температура, U — напряжение. Значения коэффициентов k и b уточняются при каждой серии экспериментов.

Автоматизированный сбор экспериментальных данных. Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения измерений, не могут быть обработаны традиционными способами из-за наличия движущегося оптического диска. Движение оптического диска вызывает сдвиг интерференционной картины (ИК) не только вследствие эффекта Физо, но также из-за наличия клина диска и механических колебаний оптических элементов экспериментальной установки. В результате возникает задача выделения сдвига ИК из повторяющегося во времени зашумлённого сигнала.

Для обработки временных интерферограмм построена математическая модель экспериментального сигнала, а также разработаны метод и алгоритм выделения искомого сигнала сдвига ИК из временной интерферограммы. Характерный вид экспериментального сигнала приведён на рис. 3. Каждый из периодов экспериментального сигнала можно описать калибровочной функцией

$$f(t) = \cos(\Omega\cos(wt + \varphi) + \delta), \qquad (3)$$

где Ω — пространственная частота колебаний; $w = \dfrac{2\pi}{T}$ — циклическая круговая частота гармонических колебаний диска; t — время; φ — начальная фаза колебаний; $\delta = 2\pi\Delta$ — сдвиг интерференционной картины в радианах.

Используя разложение Якоби—Ангера, функцию (3) можно разложить в ряд Фурье по параметру $x = wt$. При обработке экспериментального сигнала выполняется преобразование Фурье для каждого из периодов экспериментального сигнала и решается задача оптимизации

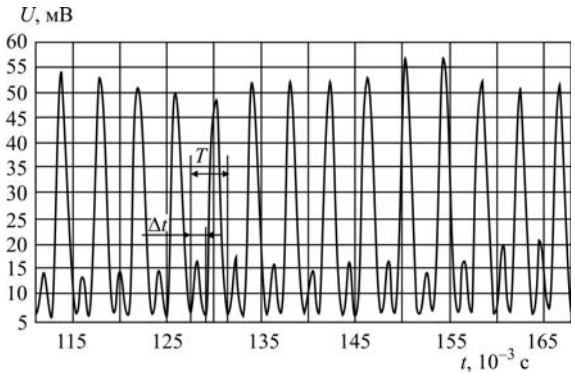


Рис. 3. Зависимость напряжения на фотодетекторе от текущего времени записи

для нахождения параметров δ, Ω и φ. При решении трёхмерной нелинейной задачи оптимизации аппробированы различные методы. В качестве оптимального метода был выбран метод наискорейшего градиентного спуска.

Каждый из экспериментов по исследованию трёхмерного эффекта Физо длится не менее суток. Выход фотодетектора экспериментальной установки подключён к АЦП, который оцифровывает сигнал на частоте 100 кГц. Каждые 15 с компьютер записывает 13,5 с или 5 МБ необработанного сигнала. В итоге за сутки получают 25 ГБ экспериментальных данных. При этом на обработку одного эксперимента тратится около 80 ч машинного времени.

В результате возникает необходимость хранить большое количество экспериментальных данных, а также быстро их обрабатывать. Второе особенно актуально, так как результат обработки во многом зависит от параметров обработки.

Распределённый программный комплекс для автоматизированной обработки данных. Для решения задачи быстрой обработки и хранения используется кроссплатформенная технология разработки приложений Java EE, которая позволяет утилизировать различные вычислительные ресурсы для задачи обработки данных, начиная от обычных персональных компьютеров и заканчивая вычислительными кластерами.

Используя "облачный" подход синхронизации различных вычислительных узлов, можно в реальном времени подключать и отключать вычислительные ресурсы без потери целостности исходных и обработанных данных. Встроенные технологии параллельных вычислений Java позволяют получить практически линейную зависимость скорости обработки экспериментальных данных от количества одновременно используемых процессорных ядер.

Рассмотрим детали реализации распределённой вычислительной системы обработчика. Необработанные данные хранятся в двоичном формате размерности *Float* (32 бита на число), сжатые алгоритмом GZip, что позволяет добиться экономии до 60 % памяти, занимаемой экспериментальными данными.

Каждый участник распределённой вычислительной системы представляет собой независимую программу, которую можно запустить на одной и более машинах. Программным процессам участников не передаётся информация о местоположении в сети и времени запуска других участников. Таким образом, ни один участник не может установить прямое соединение к другому участнику.

Для обмена сообщениями между участниками используется очередь задач: если одному участнику требуется связаться с другим, он посылает сообщение-задачу в соответствующую очередь. При этом другой участник, к которому приходит обращение, может извлечь задачу из очереди и получить сообщение, которое ему адресовано.

Данный тип хранилища используется для передачи сообщений о начале обработки эксперимента и начале обработки конкретного файла из эксперимента.

Для хранения результатов обработки эксперимента используется реляционная база данных. Каждая запись в таблице соответствует результату обработки одного файла из распределённой файловой системы. Эта запись хранит информацию о среднем значении сдвига ИП, о средней частоте вращения диска, об оценке абсолютной ошибки измерений и другую информацию.

Для распределения обработки экспериментальных данных разработано несколько типов расчётных узлов. Программная архитектура распределённого лабораторного программного комплекса представлена на рис. 4.

Первый расчётный узел называется "Управляющий программный узел", задача которого заключается в анализе необработанных и обработанных данных. После того как "Управляющий программный узел" получил команду из очереди задач для обработки эксперимента, он начинает сканировать все имеющиеся необработанные файлы из распределённой файловой

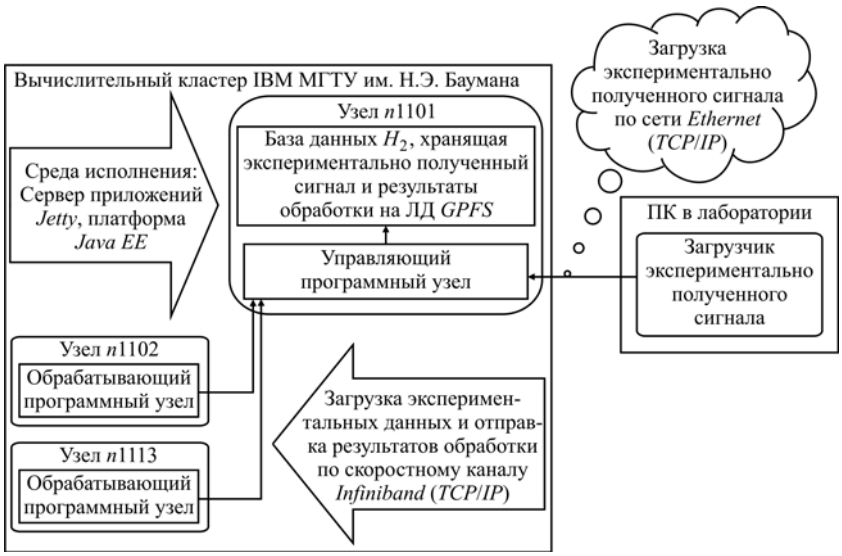


Рис. 4. Программная архитектура распределённого лабораторного программного комплекса

системы для данного эксперимента и сравнивать их с уже имеющимися результатами обработки из таблиц. На основании данного сравнения "Управляющий программный узел" посылает задачи на обработку "Обрабатывающим программным узлам".

"Обрабатывающий программный узел" — это второй расчётный узел, задача которого заключается в том, чтобы получить сообщение от "Управляющего программного узла", обработать файл из сообщения и записать результат в таблицу результатов обработки.

За счёт большого количества "Обрабатывающих программных узлов" достигается параллелизация обработки эксперимента, так как каждый из "Обрабатывающих программных узлов" работает независимо. В среднем обработка одного файла занимает около 50—60 с. При одновременной работе 100 "Обрабатывающих программных узлов" время обработки снижается с 80 ч до 50 мин.

В результате возможно увеличить объём обрабатываемых данных и снизить погрешность измерения сдвига ИК до $10^{-4}...10^{-5}$ полосы, что достаточно для экспериментальной проверки выражений (1) и (2), а также для проверки других предсказаний теории.

Заключение. Таким образом, был создан автоматизированный лабораторный измерительный комплекс для проверки следствий электродинамики движущихся сред, разработан распределённый метод обработки временных интерферограмм. На основе данного метода построен распределённый программный комплекс, осуществляющий сбор, хранение и обработку экспериментальных данных. Показано, что использование распределения задач по обработке экспериментальных данных, хранящихся централизованно, между независимыми вычислительными узлами позволяет значительно сократить время обработки больших массивов данных.

Библиографические ссылки

1. **Lorentz H.A.** On the influence of the E a r thi's motion on the propagation of light in doubly refracting bodies (1892). Coll. Papers. V. 4. Hague, 1935, p. 232.

2. **Эйнштейн А.** Собрание научных трудов. М.: Наука, 1965. Т. 1. С. 7—35.

3. **Doppler Chr.** Uber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger andern Gestirne des Himmels. Abh. Böhm Ges. 1842, V. 2. S. 465—482.

4. **d'Fizeau H.** Sur les hypotesis relatives a l'ether lumineux, et sur une experience qui parait demonter que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumiere se propage dans leur interieur. Ann. Chim. Phys. 1859. V. 57, p. 385.

5. **Michelson A., Morley E.W.** Influence of motion of the velocity of light // Am. J. Phys. 1886. V. 31. № 185. P. 377—386.

6. **Sagnac G.** L'ether lumineux demontre par l'effect du vent relative d'ether dans un interferometer en rotation uniforme. C. R. Acad. Sci. 1913. V. 33. P. 349—354.

7. **Fermi E.** Sul transcinamento del piano di polarizzazione da parte di un mezzo rotante // Rend. Lincei. 1923. V. 32 (I). P. 115—118.

8. **Bilger H.R., Stowell W.K.** Light drag in a ring laser: An improved determination of the drag coefficient. Phys. Rev. A. 1977. V. 16 (№ 1). P. 313—319.

9. **Jones R.V.** Rotary "aether drag" // Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci. 1976. V. 349. P. 423—439.

10. **Болотовский Б.М., Столяров С.Н.** Отражение света от движущегося зеркала и родственные задачи // УФН. 1989. Т. 159. № 1. С. 155—180.

11. **Загороднов О.Г., Файнберг Я.Б., Егоров А.М.** Умножение частоты с помощью "схлопывания" плазмы // ЖТФ. 1960. Т. 38. № 1. С. 7—9.

12. **Leeb W.R., Schiffner G., Scheiterer E.** Reciprocity of birefringent single-mode fibers for optical gyros // Applied Optics. 1979. V. 18. № 13. P. 2096—2097.

13. **Leeb W.R., Schiffner G., Scheiterer E.** Optical fiber gyroscopes: Sagnac or Fizeau effect? // Appl. Opt. 1979. V. 18. № 9. P. 1293—1295.

14. **Lerche I.** The Fizeau effect: Theory, experiment, and Zeeman's measurements // Am. J. Phys. 1977. Vol. 45. № 12. P. 1154—1163.

15. **Vali V., Shorthill R.W., Berg M.F.** Fresnel—Fizeau effect in a rotating optical fiber ring interferometer // Appl. Opt. 1977. Vol. 16. P. 2605—2607.

16. **Гладышев В.О.** Искривление траектории распространения плоской монохроматической электромагнитной волны в среде с вращением // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 58. № 8. С. 593—597.

17. **Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Зубарев В.Е.** Регистрация эффекта увлечения света в дисковом оптическом интерферометре // Письма в ЖТФ. 2002. № 3. С. 88—94.

18. **Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Дашко М., Трофимов Н., Шарандин Е.А.** Первые результаты измерения зависимости пространственного увлечения света во вращающейся среде от скорости вращения // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 21. С. 17—24.

19. **Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Дашко М., Трофимов Н., Шарандин Е.А.** Анизотропия пространства скоростей электромагнитного излучения в движущихся средах // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2006. Т. 3. № 2 (7). С. 173—187.

20. **Гладышев В.О., Тиунов П.С., Леонтьев А.Д, Гладышева Т.М., Шарандин Е.А.** Исследование анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения в движущейся среде // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 11. С. 54—63.

21. **Гладышев В.О., Портнов Д.И., Кауц В.Л., Шарандин Е.А.** Экспериментальные исследования поляризации лазерного излучения во вращающемся оптическом стекле // Оптика и спектроскопия. Т. 115. № 3. 2013. С. 398—405.

22. **Гладышев В.О., Портнов Д.И.** Эволюция поляризации излучения He—Ne лазера во вращающемся диэлектрике // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 4. С. 97—104.

УДК 533.6.011

В.Т. Калугин, д-р техн. наук, проф., **А.С. Епихин**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
Andy_e@bk.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОГО ПАКЕТА OpenFOAM

Показана возможность применения открытой интегрируемой платформы OpenFOAM для исследования нестационарных вихревых течений, вычисления аэродинамических характеристик органов управления полётом и летательных аппаратов. Представлены результаты численных расчётов обтекания как самолёта в целом, так и тормозного щитка, установленного на его корпусе. Для снижения пульсационных нагрузок предложен вариант перфорации тормозного щитка. Получены структуры обтекания и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: открытый пакет OpenFOAM; модель турбулентности LES; нестационарные вихревые течения; аэродинамические характеристики; круглый цилиндр; тормозной щиток; перфорация; килевой стабилизатор.

The possibility of using an open integrable platform OpenFOAM for study transient eddy currents, the aerodynamic characteristics calculation of flight control facilities aircraft is shown. The numerical calculations results of flow around an aircraft as a whole, as well as brake flap mounted on the body are introduced. Perforation verscion of a brake flap for the pulsating loads lowering is proposed. Option is offered to reduce pulsation loads perforation brake flap. Flow structures were obtained. A comparison with experimental data is carried out.

Key words: open package OpenFOAM; turbulence model LES; transient eddy currents; aerodynamics behavior; circular cylinder; brake flap; perforation; fin stabilizer.

Введение. По мере развития технологий авиационная техника усложняется и совершенствуется. Появляются новые типы летательных аппаратов (ЛА). Наличие механизации крыльев, различных вариантов внешних управляющих устройств, а также осуществление полётов на предельных углах атаки приводят к движению ЛА в условиях срывного обтекания, следовательно, к интенсивным пульсациям аэродинамических характеристик и вибрациям элементов конструкций ЛА.

Обтекание тел воздушным потоком с образованием срывающихся с его поверхностей вихрей (вихревых течений) обусловливает нестационарный характер изменения их аэродинамических характеристик. Подобные явления существенно влияют на силовые нагрузки, что необходимо учитывать не только в авиации, но и в промышленной аэродинамике, например, при строительстве и эксплуатации наземных сооружений [1]. В свою очередь, вихревые течения, генерируемые различными надстройками крыла, фюзеляжа или фонаря ЛА, могут воздействовать на элементы конструкции ЛА, что вызывает их тряску вследствие периодических ударных нагрузок. Это приводит к вибрации обшивки, стенок топливных баков, к колебаниям несущих поверхностей и органов управления ЛА. Проведённый анализ научных исследований и публикаций показал, что существуют различные методы уменьшения пульсационных нагрузок, к которым относятся видоизменение кромок органа управления [2, 3] или его перфорация [4].

Описание математической модели для расчёта нестационарных турбулентных течений. Численное моделирование при решении аэродинамических задач характеризуется широким распространением лицензионных коммерческих пакетов программного обеспечения и использованием суперкомпьютеров. В настоящее время находят применение универсальные коммерческие пакеты типа STAR-CD, ANSYS CFX, FlowVision, COSMOS FloWorks. Альтернативой является развитие открытых пакетов, например OpenFOAM, которые позволяют решать широкий круг задач механики сплошной среды [5].

Основой любого численного метода, применяемого в аэродинамике, является математическая модель, включающая в себя систему уравнений, описывающих законы сохранения. Эти уравнения решаются при начальных и граничных условиях, характерных для рассматри-

ваемых задач. В качестве основных уравнений используются уравнения неразрывности, движения и энергии, которые дополняются уравнением состояния:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0;\\
&\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \tau;\\
&\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla[\vec{u}\tau + \vec{q}];\\
&\rho = \frac{pM}{RT},
\end{aligned} \qquad (1)$$

где ρ — плотность; $\vec{u}$ — вектор скорости; p — давление; T — температура; R — универсальная газовая постоянная; M — молярная масса; E — полная энергия; H — полная энтальпия; τ — тензор вязких напряжений; $\vec{q}$ — тепловой поток; t — время.

В работе использовался метод конечного объёма [6], основой которого является дискретизация системы уравнений (1) на произвольных сетках. Алгоритм связи между давлением и скоростью предусматривал различные подходы [6, 7]. Проведённый анализ результатов численных экспериментов показал, что для задач с установившейся картиной течения следует применять алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations — полунеявный метод решения уравнений, содержащих давление). Для задач с нестационарным течением — метод PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators — неявный метод с разделением операторов). Существует также смешанный алгоритм PIMPLE (PISO-SIMPLE), отличающийся тем, что на каждом шаге по времени внутри основного цикла PISO делается несколько шагов методом SIMPLE. Данные методы реализованы в соответствующих решателях OpenFOAM. В рамках данной работы для расчёта нестационарного несжимаемого вихревого потока выбран решатель pisoFoam, использующей алгоритм PISO для связи уравнения скорости и давления.

При математическом моделировании отрывных течений для замыкания уравнений движения Навье-Стокса в системе (1) могут применяться подходы, связанные с использованием осреднённых уравнений по Рейнольдсу (*RANS*) [8, 9], метода крупных вихрей (*LES*) [10], а также гибридных моделей, совмещающих эти два подхода [11]. Система уравнений *LES* по форме аналогична системе уравнений *RANS*, но физическое содержание этих систем различно. Так, содержащие напряжения Рейнольдса, члены *RANS* описывают влияние всех турбулентных неоднородностей на осреднённое решение, а аналогичные члены уравнений *LES* описывают влияние вихрей, размеры которых меньше величины фильтра [12]. Установлено, что для задач внешней аэродинамики, связанных с расчётом безотрывных течений или течений с ограниченными отрывными зонами, наиболее целесообразно применять *RANS*-модели турбулентности, например, модель Спаларта и Аллмараса (*SA*-модель), и Ментера. Однако из-за высокой степени диссипации энергии данные модели не подходят для моделирования развитых отрывных течений. Таким образом, для численного моделирования крупномасштабных вихревых структур выбран метод крупных вихрей и разработанная гибридная модель, совмещая в себе *RANS* и *LES* подходы [13].

Результаты численного моделирования. Для верификации методики численного моделирования проведены расчёты обтекания цилиндра с диаметром $d = 0{,}4$ м и длиной $l_z = 3d$ м. Начало координат совпадает с центром масс цилиндра. Трёхмерная расчётная область представляла собой прямоугольный параллелепипед. Входная граница удалена от начала исследуемого тела на 5 калибров вверх по потоку, а выходная на 12 калибров вниз, высота области составляла 10 калибров (рис. 1). Дополнительно выполнялось сгущение сетки и построение призматических слоёв у поверхности цилиндра.

Расчёт проводился на неструктурированной сетке с количеством ячеек, равным $2{\cdot}10^6$, с использованием *LES*-модели турбулентности и следующими исходными данными: скорость набегающего потока изменялась от $U_1 = 7{,}5{\cdot}10^{-4}$ м/с до 33,75 м/с, что соответствует диапазону чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = 20 - 9{\cdot}10^5$ ($\mathrm{Re} = \frac{U_1 d}{\nu}$, где кинематическая вязкость $\nu = 1{,}5{\cdot}10^{-5}$ м^2/с). Параметр y^+ находился в пределах 0,03—9, что соответствовало накладываемым ограничениям на использование модели турбулентности.

Результаты вычислительного эксперимента по обтеканию цилиндра приведены на рис. 2—4. Сравнение структур обтекания цилиндра для

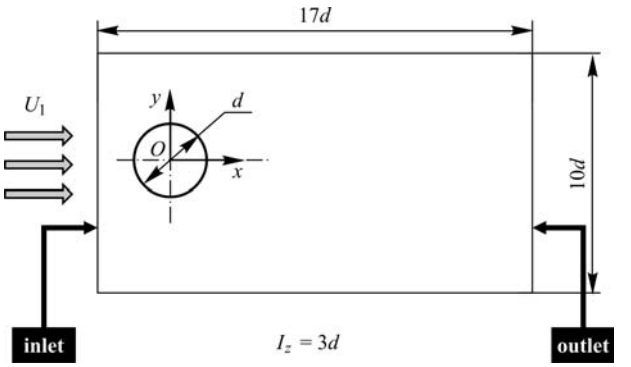


Рис. 1. Схема расчётной области при численном моделировании обтекания круглого цилиндра

чисел Рейнольдса $Re_1 = 20$ и $Re_2 = 3{,}5 \cdot 10^4$ показаны на рис. 2, 3 (см. обложку).

При числах Рейнольдса $Re \leqslant 20$ отрывное течение вокруг цилиндра близко к установившемуся. С возрастанием скорости в кормовой части цилиндрической поверхности пограничный слой возрастает, в некоторой точке отрывается и в данной области формируется отрывное течение, состоящее из пары симметричных постепенно увеличивающихся в размерах вихрей. С дальнейшим изменением числа Рейнольдса ($Re \geqslant 200$) обтекание приобретает нестационарный характер и наблюдается периодический срыв вихрей с поверхности цилиндра в кормовой его части. В результате численных расчётов получен коэффициент продольной силы цилиндра от числа Рейнольдса (см. рис. 4) и проведён анализ частоты срыва вихрей с его поверхности. Число Струхаля $St = \frac{fd}{U_1}$ (где f — частота срыва вихрей) для варианта обтекания цилиндра при числе Рейнольдса $Re_2 = 3{,}5 \cdot 10^4$ равно 0,194. Эти данные показывают хорошее совпадение с результатами экспериментов, опубликованных в работе [15], погрешность не превышает 10 %.

Проведённый расчёт показал принципиальную возможность применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования вихревого нестационарного обтекания тел, что позволяет использовать данную методику для изучения бафтинговых явлений.

При исследовании бафтинга в задаче трёхмерного обтекания самолёта с установленным на его фюзеляже тормозным щитком проведена серия расчётов с использованием разработанной гибридной модели турбулентности, построенной с применением *RANS* и *LES* методов [13]. В качестве *RANS*-модели турбулентности использовалась k—ω *SST*, для *LES* — модель одного дифференциального уравнения для подсеточной кинетической энергии [10]. Область использования *RANS*- и *LES*-моделей задаётся начальными условиями, исходя из целесообразности применения той или иной модели турбулентности и качества расчётной сетки. В данном случае необходимо точно промоделировать отрыв потока с тормозного щитка и влияние вихрей на килевой стабилизатор. При этом течение в остальной области может быть получено при помощи *RANS*-модели. Таким образом, построена расчётная сетка с количеством $11 \cdot 10^6$ ячеек и дополнительным измельчением в области между тормозным щитком и килевым стабилизатором (рис. 5, *а*, см. обложку) для применения в ней метода LES (рис. 5, *б*, см. обложку).

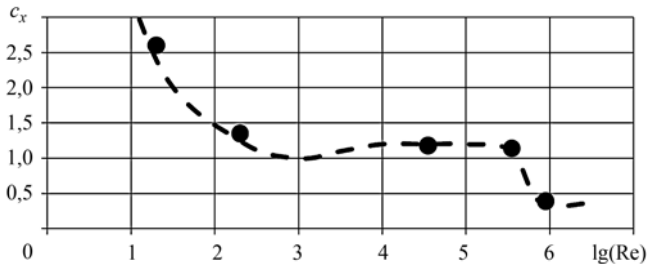


Рис. 4. Коэффициент продольной силы цилиндра в зависимости от числа Рейнольдса:
--- — эксперимент [15]; ● — численное моделирование

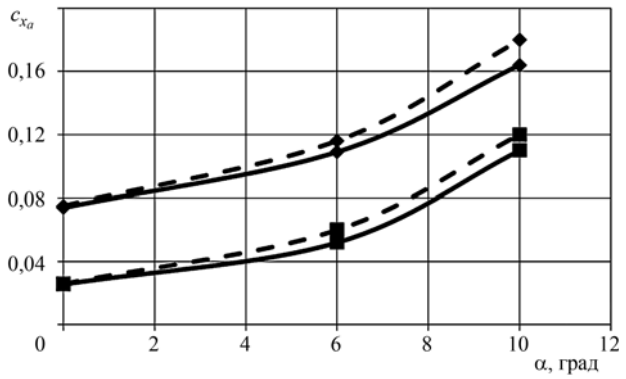


Рис. 7. Коэффициент лобового сопротивления ЛА:
— экспериментальные данные; -- — численное моделирование; ■ — без тормозного щитка; ♦ — с тормозным щитком (U_1 = 50 м/с)

Расчёт проводился со следующими исходными данными: в начальный момент времени скорость набегающего потока $U_1 = 50$ м/с, кинематическая вязкость $\nu = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м^2/с, число Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^6$. Расчётный шаг по времени $dt = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ с. На входе в расчётную область задавался модуль вектора скорости и значения параметров моделей турбулентности, исходя из степени турбулентности потока $Tu = 5$ %, на выходе — давление. На стенках тормозного щитка, килевого стабилизатора и фюзеляжа использовались условия прилипания и непроницаемости.

Получены структуры обтекания ЛА с установленным тормозным щитком (рис. 6, см. обложку) и его аэродинамические характеристики в зависимости от углов атаки $\alpha = 0$; 6; 10° (рис. 7). Расчёт показал хорошее совпадение с экспериментальными данными. График изменения коэффициента поперечной силы ($c_z = \frac{F_z}{qS}$, где q — скоростной напор; $S = 1$ м^2 — характерная площадь; F_z — поперечная сила) на килевом стабилизаторе в зависимости от времени показан на рис. 8.

Анализ структур обтекания показал, что поток срывается с кромок тормозного щитка и образуется нестационарное вихревое течение, ко-

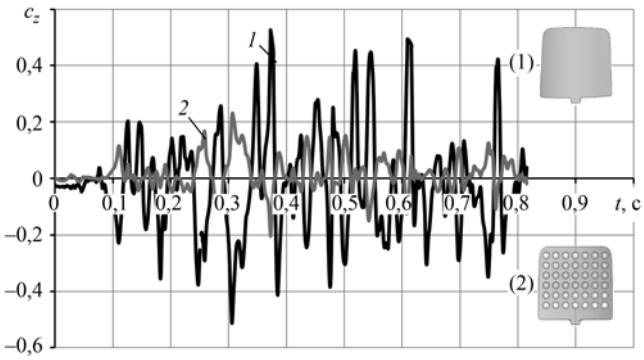


Рис. 8. Пульсации коэффициента поперечной силы при обтекании килевого стабилизатора потоком, формируемым:
— — тормозным щитком; **—** — перфорированным тормозным щитком (U_1 = 50 м/с)

торое проходит над килевым стабилизатором и вызывает различные значения давления на правой и левой его стороне, что приводит к пульсациям поперечной силы (рис. 8, кривая *1*). Для снижения динамических нагрузок рассмотрен вариант перфорированного щитка со степенью перфорации $\sigma = \frac{S_{отв}}{S_{щ}} = 0,3$, где $S_{отв}$ — суммарная площадь отверстий; $S_{щ}$ — площадь тормозного щитка. Видно, что величина пульсаций при использовании перфорированного тормозного щитка (рис. 8, кривая *2*) примерно на 40 % меньше, чем для исходного варианта. За счёт перфорации происходит дробление поля течения и уменьшаются размеры вихрей, воздействующих на килевой стабилизатор, что приводит к снижению нестационарных нагрузок.

Заключение. Показана возможность применения открытого пакета OpenFOAM и разработанной на его основе гибридной модели турбулентности для исследования нестационарных вихревых течений и вычисления силовых нагрузок на элементы конструкции ЛА. Получены структуры обтекания и аэродинамические характеристики в расчётах круглого цилиндра и тормозного щитка, установленного на фюзеляж самолёта. Погрешность вычисления не превышает 10 %.

Проведён анализ влияния тормозного щитка на нестационарные нагрузки на килевом стабилизаторе самолёта. Установлено, что при использовании тормозного щитка появляются пульсации коэффициента поперечной силы на килевом стабилизаторе. Показано, что применение перфорации тормозного щитка снижает динамические нагрузки примерно на 40 %.

Продемонстрирована работоспособность разработанной методики для тел, приближённых к реальной конфигурации ЛА, что позволяет проводить детальный анализ бафтинговых эффектов при различных скоростях обтекания.

Библиографические ссылки

1. **Сущев С.П., Адаменко И.А., Самарин В.В., Суслонов А.А., Калугин В.Т., Киндяков Е.Б.** Теоретические исследования по установлению причин разрыва анкерных болтов и образования трещин в четырёх рядом стоящих стальных дымовых трубах. Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. Вып. 9. М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2010. 704 с.

2. **Мертоль А.Б., Клееманн Ф., Вебер К., Фишер М.** Способ и устройство для создания аэродинамического сопротивления на самолёте // Патент России № 2455196. 2010.

3. **Бендер К.** Тормозной щиток для самолета // Патент России № 2425780. 2011.

4. **Епихин А.С., Калугин В.Т., Чернуха П.А.** Аэродинамические характеристики стабилизирующих поверхностей при дозвуковом вихревом обтекании // Науч. вестник Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации. 2013. № 188 (2). С. 19—23.

5. **Калугин В.Т., Голубев А.Г., Епихин А.С., Мичкин А.А.** Возможности применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования отрывных течений при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания летательных аппаратов // Науч. вестник Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации. 2014. № 199 (1). С. 23—30.

6. **Ferziger J.H., Peric M.** Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd, rev: ed. Berlin et al.: Springer, 2002. 423 p.

7. **Issa, R.:** Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. J. Comput. Phys. 62, 1986. P. 40—65.

8. **Белов И.А., Исаев С.А.** Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 2001. 108 с.

9. **Wilcox David C.** Turbulence Modeling for CFD / DCW Industries, Inc., 1994. 460 p.

10. **Волков К.Н., Емельянов В.Н.** Моделирование крупных вихрей в расчётах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.

11. **Fröhlich J. and von Terzi D.** Hybrid LES/RANS methods for simulation of turbulent flows, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, Issue 5, 2008. P. 349—377.

12. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчётах сложных течений: учеб. пособие. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.

13. **Калугин В.Т., Епихин А.С.** Особенности расчёта бафтинговых явлений при моделировании обтекания летательного аппарата с использованием открытого пакета OpenFOAM // Науч. вестник Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации. 2015. № 212 (2). С. 32—37.

14. **Ван-Дайк М.** Альбом течений жидкости и газа М.: Мир. 1986, 184 с.

15. **Younis Nibras.** The Role of Turbulent Integral Length Scale on The Drag of a Circular Cylinder in Cross Flow (2010). Electronic Theses and Dissertations. P. 216.

УДК 004.514:159.937

А.Н. Алфимцев, канд. техн. наук, доц., **Ф.И. Хает**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

alfim@bmstu.ru

ГЕНДЕРНЫЕ РАЗЛИЧИЯ В ВОСПРИЯТИИ ИНФОРМАЦИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Представлены результаты исследования влияния пола, возраста и образования пользователей на параметры интерфейсов различных компьютерных систем. Проанализированы гендерные предпочтения пользователей. Экспериментально проверена гипотеза о гендерных когнитивных различиях, определяющих предпочтения пользователей для интерфейса операционной системы, его фоновой заставки, количества элементов интерфейса и основных цветов.

Ключевые слова: пользовательский интерфейс; гендер; когнетика; половая дифференциация; цветовые схемы; персонализация.

The research results of sex effect, age and education influence on the interface parameters of different computer systems are introduced. Gender preferences of users are analyzed. Hypothesis about gender differences in cognitive defining user preferences for the operating system interface is experimentally verified: the wallpaper, the number of interface elements and primary colors.

Key words: the user interface; gender; kognitive sciience; sexual differentiation; color schemes; personalization.

Введение. В связи с активным применением интеллектуальных технологий при проектировании пользовательского интерфейса появились технические возможности оптимизации его параметров для определённых пользователей с учётом совокупности их конкретных характеристик [1]. Это позволяет добиться более точного соответствия параметров интерфейса требованиям пользователя и, соответственно, большей рыночной привлекательности, увеличению объёма продаж персональных компьютеров, планшетов, мобильных телефонов и увеличению качества человеко-машинного взаимодействия в системах реального времени [2]. Из широкого круга задач персонализации пользовательского интерфейса ниже рассматривается задача определения гендерных различий для оптимизации параметров интерфейса.

При анализе цветовых предпочтений людей и их влияния на запоминание информации российскими исследователями было обнаружено, что большинство респондентов предпочитают голубой цвет [3]. Однако на примере пользовательских интерфейсов европейские ученые выявили гендерные различия по цвету, форме объектов и типам шрифтов [4]. Кроме того, с помощью семантического анализа текста были предприняты попытки определить "мужскую" и "женскую" статистические модели восприятия информации, проанализировать гендерные различия в отношении ко временным задержкам в интерфейсе, а также уровню социализации и эмоциональным реакциям пользователя [5]. Феминистически настроенные исследователи также утверждают, что разработчиками программного обеспечения чаще всего являются мужчины, которые проектируют интерфейсы под себя, что приводит к неоптимальности принимаемых решений женщинами. В связи с этим даже предлагается "руководство для уменьшения гендерной дискриминации в компьютерных системах" [6]. Гендерные различия выявлены и при концентрации внимания пользователя на баннерной рекламе [7]. Кроме того, установлено, что при разработке интерфейса необходимо учитывать не только пол, но и культурные особенности пользователей [8].

Из обзора исследований видно, что, во-первых, учёт пола пользователя является необходимым условием с точки зрения современных технологий разработки пользовательских интерфейсов; во-вторых, к настоящему моменту разработано несколько противоречивых моделей "мужских", "женских", "полонейтральных" [9] интерфейсов, а также предложены различные методы их экспериментального определения; в-третьих, отчётливо выявлено влияние культурных особенностей на указанные результаты, что обусловливает необходимость проведения дополнительных исследований в конкретной среде пользователей.

Цель и условия эксперимента. Целью данной работы было исследование российских пользователей персональных компьютеров, планшетов

и мобильных телефонов для установления корреляции между параметрами интерфейса и гендерными характеристиками пользователя. Экспериментальное исследование проводилось на тестовой выборке из 150 пользователей (г. Москва), которая включала в себя пользователей обоего пола от 14 до 68 лет с уровнем образования от начального до пользователей с учёной степенью. Демографические и социальные характеристики пользователей были учтены анкетой: паспортный пол, возраст пользователя и уровень образования. При проведении эксперимента фиксировали как количественные, так и качественные параметры интерфейса. Для получения и обработки экспериментальных данных было разработано специальное программное обеспечение распознавания образов на основе нечёткой конечно-автоматной модели.

Среди качественных параметров устройства определялись: тип и назначение устройства (ПК для личного или рабочего использования, планшет, смартфон); тип операционной системы устройства (Windows XP, Windows 7, Windows 8, MacOSX, Ubuntu, Linux — для персональных компьютеров; iOS, Android — для мобильных устройств). В цветовых параметрах интерфейса рабочего стола учитывались: максимальный по площади основной цвет; второй по площади основной цвет (при его наличии); третий по площади основной цвет (при его наличии); максимальный по площади основной цвет экрана блокировки (для мобильных устройств). Параметры интерфейса рабочего стола для персональных компьютеров включали расположение главного меню; наличие и расположение дополнительного экрана; наличие и расположение корзины на экране.

Количественные параметры изображения на рабочем столе, кроме количества цветов, учитывали наличие стандартной заставки; сплошного фона; чёрно-белого фона; усреднённой светлоты экрана (субъективный признак, характеризующий ощущение объективной величины яркости); усреднённого (по длине волны) цвета экрана. Количественные параметры интерфейса рабочего стола включали разрешение экрана; количество папок, файлов, ярлыков и корзин на рабочем столе; общее количество элементов на рабочем столе; количество экранов устройства; сложность интерфейса.

Сложность интерфейса C в соответствии с теорией информационной энтропии Клода Шеннона, доработанной Джи Бонсипе, определяли по формуле [10]:

$$C = -N\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i, \qquad (1)$$

где N — количество всех объектов; $p_i = n_i/n$; n_i — количество объектов i-го класса; n — количество классов (здесь под классами понимались папки, файлы, ярлыки, системные утилиты).

Полученные экспериментальные данные обработаны с использованием классических статистических методов: корреляционно-регрессионного и факторного анализа с установлением статистической значимости результатов.

Результаты эксперимента. В результате проведённого экспериментального исследования были получены следующие результаты. Женщины чаще, чем мужчины применяют операционную систему iOS (рис. 1, см. обложку). Для персональных компьютеров женщины чаще выбирают операционную систему Windows, при этом мужчины используют большее количество различных операционных систем. Это можно объяснить более высокой среднестатистической технической грамотностью мужчин.

Анализ данных для всех устройств позволил установить, что количество используемых цветов у женщин несколько выше, чем у мужчин (рис. 2), а также у женщин в целом больше папок, файлов, ярлыков, корзин и других элементов интерфейса (рис. 3). Это отвечает склонности женщин к демонстративности, украшательству, самовыражению [11]. Если раньше самовыражение, в основном, было связано с утончённым отношением к одежде и аксессуарам, то теперь это относится и к интерфейсам компьютеров и мобильных устройств, которые в настоящее время становятся не только простым атрибутом, но значимым выражением личности пользователя.

Женщины предпочитают более яркий экран (рис. 4) и холодные цвета (фиолетовый, синий, зелёный), а мужчины — тёплые (красный, оранжевый, жёлтый) (рис. 5). Эти два экспериментально установленных факта открывают для разработчиков дополнительные возможности

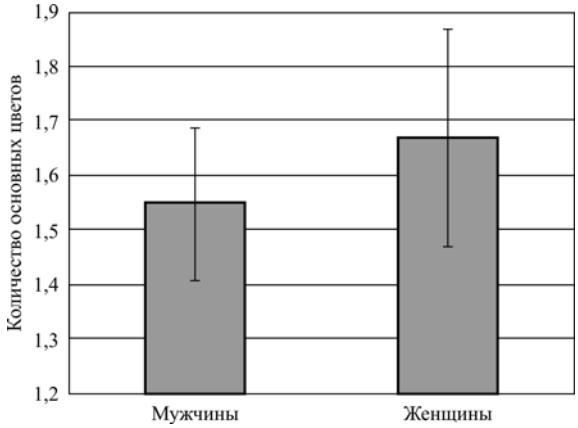


Рис. 2. Влияние пола пользователя на количество используемых основных цветов экрана

обеспечить размещение на экране большего количества элементов разной формы и разного цвета. На ярких экранах холодных тонов (фон) визуальное восприятие элементов происходит наиболее эффективно [7].

Женщины реже пользуются стандартными заставками (рис. 6, см. обложку). Возможно, что нестандартные заставки позволяют женщинам лучше выразить и проявить свою индивидуальность.

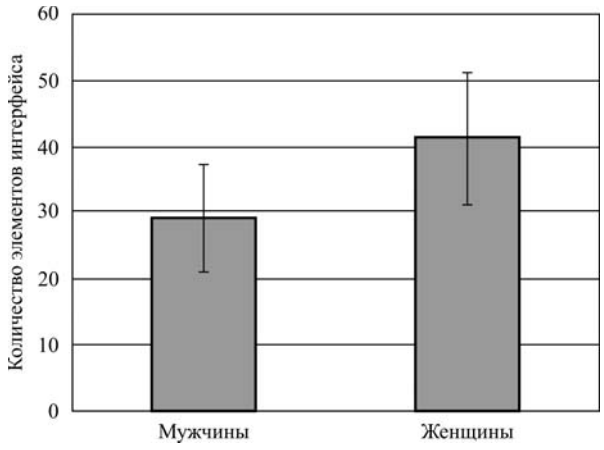


Рис. 3. Влияние пола пользователя на количество элементов интерфейса

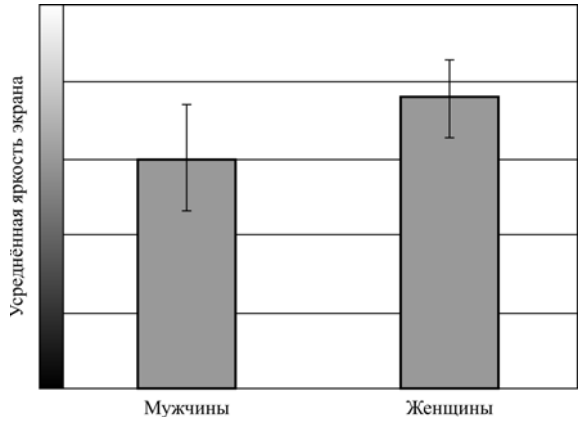


Рис. 4. Влияние пола пользователя на усреднённую яркость экрана

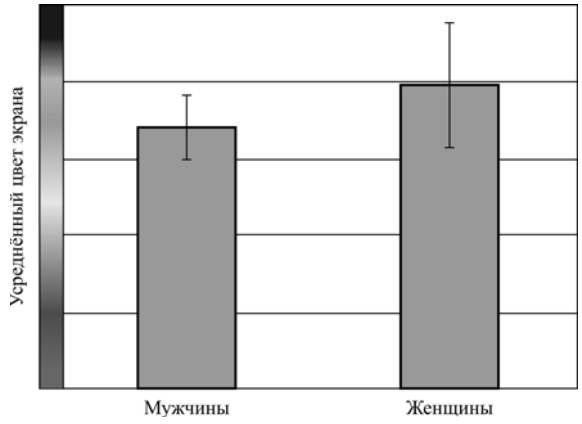


Рис. 5. Влияние пола пользователя на усреднённый (по длине волны) цвет экрана

Среднее количество основных цветов экрана у женщин больше, монохромные экраны у них встречаются реже (рис. 7, см. обложку). Это отвечает той же тенденции подсознательного демонстрирования собственной "яркости", "цветности".

Учитывая женские физиологические особенности восприятия цветовых сочетаний [12], большой интерес представляют цветовые схемы для гендерно-ориентированных интерфейсов. Эксперимент показал, что наиболее часто встречаются изображения интерфейсов в синих и голубых цветах, причём для пользователей обоих полов. Это объясняется эффектом Пуркинье: при недостаточном освещении наиболее светлыми воспринимаются синий и голубой цвета [13]. Неслучайно для стандартных заставок производители программного обеспечения чаще используют сочетания именно этих цветов.

В целом, мужчины предпочитают тёмные цвета и их различные сочетания, а также сочетания синих цветов с зелёным, тёмным и оранжевым (рис. 8, см. обложку). Женщины предпочитают сочетания фиолетового цвета с белым, белый цвет с серым. Важно отметить, что количество используемых цветовых схем у женщин на 20 % выше, чем у мужчин.

Кроме гендерных различий установлено также влияние на параметры интерфейса демографических и социальных характеристик пользователя. С повышением возраста и уровня образования (сильно коррелированных, что дало основание в данной работе рассматривать их как два аспекта возраста — биологический и социальный) доля рабочих ПК увеличивается, что естественно, так как основной сферой деятельности индивида всё более становится профессиональная, повышается и количество используемых устройств в целом. С повышением возраста и образовательного уровня пользователя экран становится ярче (в среднем на 20 %), происходит больший сдвиг в сторону высокочастотной области видимой части электромагнитного спектра, что способствует улучшению различения элементов на фоне экрана. Это может быть следствием возрастных физиологических изменений — ухудшения чувствительности рецепторов и деформация хрусталика.

Заключение. Таким образом, можно выделить основные закономерности, которые были выявлены в результате экспериментального исследования гендерных различий и которые могут быть полезны при условии идентичности культурной среды как современным разработчикам пользовательских интерфейсов компьютерных систем, так и специалистам по маркетингу и продвижению брендов:

женщины на 26 % чаще используют операционную систему Windows на персональных компьютерах и на 28 % — iOS на мобильных устройствах;

интерфейс, который используют женщины на 31 % сложнее;

мужчины на 8 % чаще применяют стандартные заставки интерфейса рабочего стола;

мужчины предпочитают более тёмный экран и тёплые цвета, а женщины — более светлый экран и холодные цвета;

для пользователей обоих полов наиболее характерны цветовые схемы, основанные на голубом цвете. Однако мужчины чаще предпочитают сочетания синих цветов с зелёным и оранжевым, а женщины — сочетания фиолетового и серого цветов с белым.

Библиографические ссылки

1. **Девятков В.В., Алфимцев А.Н.** Нечёткая конечно-автоматная модель интеллектуального мультимодального интерфейса // Проблемы управления. 2011. № 2. С. 69—77.

2. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кэ Ф., Ким Ч.** Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 2. С. 30—34.

3. **Сурнина О.Е., Ширёва С.Н.** Влияние цвета на восприятие информации // Новые информационные технологии в образовании: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (НИТО-2013), Екатеринбург, 12—15 марта 2013 г. / ФГАОУ ВПО "Рос. гос. проф.-пед. ун-т". Екатеринбург, 2013. С. 125—127.

4. **Gender** issues in HCI design for WEB access / Boiano S. [et al.]. Hershey: Information Science Reference, 2008. P. 3175—3202.

5. **Liu H., Mihalcea R.** Of Men, Women, and Computers: Data-Driven Gender Modeling for Improved User Interfaces // Proc. of International Conference on Weblogs and Social Media. Boulder, USA. 2007. P. 121—128.

6. **Bardzell S.** Feminist HCI: Taking Stock and Outlining an Agenda for Design // Proc. of CHI 2010: World conference on Human factors in computing systems. Atlanta, USA. 2010. P. 1301—1310.

7. **Алфимцев А.Н., Хает Ф.И.** Пути преодоления баннерной слепоты в веб-интерфейсах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 4. С. 70—79.

8. **Chang C.-L., Su Y.** Cross-cultural interface design and the classroom-learning environment in Taiwan // Turkish Online Journal of Educational Technology. 2012. № 11 (3). P. 82—93.

9. **Orji R., Mandryk R.L.** Developing culturally relevant design guidelines for encouraging healthy eating behavior // International Journal of Human-Computer Studies. 2014. № 72 (2). P. 207—223.

10. **Comber T., Maltby J.R.** Investigating Layout Complexity // Proceedings of the Second International Workshop on Computer-Aided Design of User Interfaces (CADUI'1996). Namur, Belgium. 1996. P. 209—228.

11. **Бем С.** Линзы гендера: Трансформация взглядов на проблему неравенства полов. М.: Российская политическая энциклопедия (Росспэн), 2004. 336 с.

12. **Степанова О.** Особенности зрения мужчин и женщин [Электронный ресурс]. URL: http://http://www.glazmed.ru/lib/public32/glazinf0002.shtml (дата обращения: 13.02.2015).

13. **Шиффман Х.** Ощущение и восприятие. СПб.: Питер, 2003. С. 157—160.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Теория формирования отливки

Учебник

Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И.

480 с. ISBN 978-5-94275-757-1 2015 г.

Изложены основы теории формирования отливок, начиная от приготовления расплава до получения готовой отливки. Приведены физические и литейные свойства металлов и сплавов, вопросы кристаллизации, затвердевания и охлаждения, теоретические и практические аспекты, оказывающие влияние на качество отливок.

Для студентов машиностроительных и металлургических направлений и специальностей высших учебных заведений. Может быть использован инженерно-техническими работниками, аспирантами и преподавателями в практической и учебной работе.

Цена 800 р.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

По факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98 или на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 004.051 + 519.163

В.А. Овчинников, д-р техн. наук, проф., **Г.С. Иванова**, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

gsivanova@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМИЗИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В АЛГОРИТМЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ ГИПЕРГРАФОВ

На примере задачи разрезания гиперграфов показана эффективность оптимизирующих преобразований алгоритмов, использующих последовательный принцип формирования решения. Изложенная методика анализа алгоритма, выявления возможных способов снижения его вычислительной сложности и трансформации может быть применена при разработке других алгоритмов, использующих указанный принцип.

Ключевые слова: алгоритм; декомпозиция гиперграфа; вычислительная сложность; оптимизирующие преобразования; эффективность.

The efficiency of optimizing algorithms transformations using serial principle of decision forming is shown on the example of cutting hypergraphs scission. The stated analysis methodology of the algorithm, revelation of the possible ways its computational complexity and transformation lowering can be applied when other algorithms development that use this principle.

Key words: algorithm; hypergraph decomposition; computational complexity; optimizing transformations; efficiency.

Введение. Задача декомпозиции обыкновенных графов и гиперграфов решается при проектировании средств электронной вычислительной техники, автоматизированных систем управления безопасностью критически важных объектов, при создании систем коллективной инженерии, мобильных баз данных, семантических сетей [1—4].

Указанная задача относится к классу *NP*-полных и имеет большую размерность входа. В различных предметных областях количество компонентов проектируемых объектов может насчитывать от сотен до десятков миллионов единиц. В связи с этим использование на практике даже простейших алгоритмов поиска приближённого решения требует очень больших вычислительных ресурсов. Одним из подходов к решению данной проблемы является снижение размерности входа задачи — так называемая многоуровневая декомпозиция [3, 5, 6]. Очевидно, что применение проектных алгоритмов к редуцированному гиперграфу, т. е. модели, представляющей объект с меньшей степенью детализации, не может дать решение более близкое к оптимальному, чем их применение к модели исходного описания. В связи с этим перспективным является направление, заключающееся в применении способов снижения вычислительной сложности комбинаторно-оптимизационных алгоритмов на графах и множествах.

Анализ последовательного алгоритма разбиения множества вершин гиперграфа. Использование оптимизирующих преобразований рассмотрим на примере последовательного алгоритма решения задачи декомпозиции схемы как задачи разбиения множества вершин X гиперграфа $H(X, U)$ на совокупность непересекающихся подмножеств $B(X_l)$ кусков $H_l^{\text{к}}$ (X_l, U_l), $l = 1, L$, $|X_l| = n_{\text{доп}}$, $n_{\text{доп}} = n/L$, $n = |X|$ [7]. Выбор последовательного алгоритма продиктован его простотой и возможностью применения довольно широкого круга способов снижения вычислительной сложности.

Особенностями системы, моделью которой является гиперграф, являются:

число входов/выходов компонентов системы и количество соединяемых связями компонентов могут изменяться в довольно широком диапазоне;

количество компонентов и связей систем, для декомпозиции которых будет использоваться алгоритм, может существенно отличаться.

Идея алгоритма заключается в последовательном включении в множество вершин X_l вершин-кандидатов из множества Xк *по минимуму количества рёбер, попадающих в разрез.* В качестве Xк рассматриваются вершины, смежные вершинам множества X_l. На рис. 1 показано разрезание гиперграфа после седьмого шага работы алгоритма.

Для того чтобы проиллюстрировать возможности применения довольно широкого набора оптимизирующих преобразований, начнём с более простой, чем приведено в работе [8], вер-

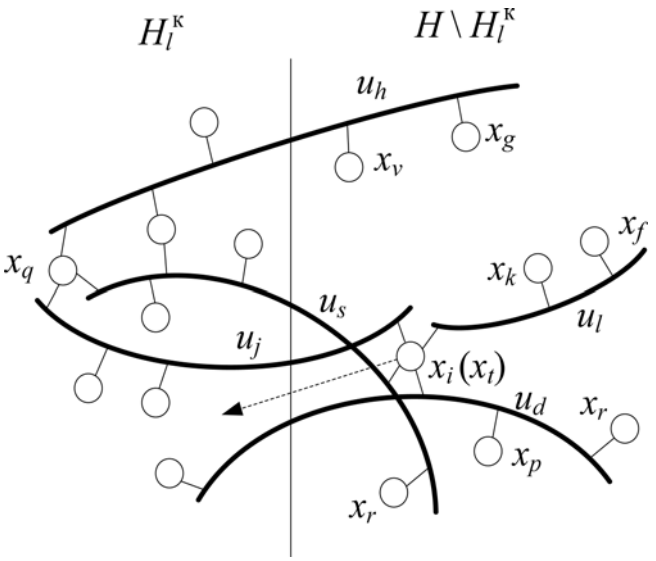


Рис. 1. Разрезание гиперграфа на текущем шаге работы алгоритма

сии алгоритма. Гиперграф задан множествами вершин X, рёбер U и их образами $\Gamma X = \{\Gamma x_i / x_i \in X\}$ и $\Gamma U = \{\Gamma u_j / u_j \in U\}$ относительно предикатов инцидентности $\Gamma(X, U)$ и $\Gamma(U, X)$. Напомним, что $\Gamma x_i = U_i \subseteq U$ — подмножество рёбер, инцидентных вершине x_i, и $\Gamma u_j = X_j$ — подмножество вершин, инцидентных ребру u_j.

Описание первой версии алгоритма.

1. В множество X_l включается некоторая исходная вершина x_q: $X_l := \{x_q\}$.

2. Используя образы вершин ΓX относительно предиката инцидентности $\Gamma(X, U)$, находится множество ребер U_l, инцидентных вершинам подмножества X_l: $U_l = \cup\, \Gamma x_i$, $x_i \in X_l$.

3. Определяется множество вершин-кандидатов на включение в X_l. Это будут вершины множества Xк: Xк $= \Gamma(U_l) \backslash X_l$, где $\Gamma(U_l) = \cup\, \Gamma u_j$, $u_j \in U_l$.

4. Для вариантов включения в X_l каждой $x_i \in X$к подсчитывается количество ребер, попадающих в разрез: $\forall x_i \in X$к : $s_i(X_l \cup x_i) = |\Gamma(X_l \cup x_i) \cap \cap\, \Gamma(X \setminus \{X_l \cup x_i\})|$.

5. Выбирается из Xк очередная вершина x_t по минимуму количества рёбер в разрезе: $s_t = \min\{s_i \in S$к$\}$, $x_t \leftrightarrow s_t$.

6. Проверяется ограничение на количество внешних выводов l-й части схемы: $s_t \leqslant S_{доп}$.

Если условие выполняется, то осуществляется переход к п. 7, иначе — к п. 9.

7. В множество X_l включается вершина x_t: $X_l := X_l \cup x_t$, $S := s_t$.

8. Проверяется условие: $|X_l| < n_{доп}$.

При выполнении условия осуществляется переход к п. 2, в противном случае — к п. 10.

9. Дальнейшее формирование подмножества X_l невозможно.

10. Вывод результатов.

Конец работы алгоритма.

При оценке вычислительной сложности в качестве основной примем операцию сравнения. Подсчитаем количество операций, необходимых для получения множества рёбер $U_l = \Gamma(X_l) = \cup\, \Gamma x_j$, $x_j \in X_l$ в п. 2 алгоритма. В ходе работы алгоритма $|X_l| = I$, $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$. Количество операций сравнения рёбер множеств Γx_j, необходимых для получения множества U_l на I-м шаге алгоритма:

$$N_l = \rho^2 \sum_{i=2}^{I} [1 + a(i-2)],$$

где $\rho = |\Gamma x_j|_{ср}$; $a = |U_j^*|/|U_j|$; $U_j^* \subset U_j$ — множество рёбер, принадлежащих вершине x_j и не принадлежащих вершине x_i; $0 \leqslant a \leqslant 1$.

Суммируя по $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$, получим, что количество операций сравнения для определения всех множеств U_l будет равно

$$N_2 = \rho^2 \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} \sum_{i=2}^{I} [1 + a(i-2)].$$

После несложных преобразований получаем оценку с точностью до аддитивной константы:

$$N_2 = \rho^2 (k_1 n_{доп}^3 - k_2 n_{доп}^2 + k_3 n_{доп}),$$

где $k_1 = a/6$; $k_2 = (a-1)/2$; $k_3 \approx 2\,a - 3/2$.

Поскольку $n_{доп} = n/L$, где L — константа, асимптотическая оценка вклада п. 2 в вычислительную сложность алгоритма равна $O(n^3)$.

Оценим количество операций, необходимых для получения в п. 3 множества Xк $= \Gamma(U_l) \backslash X_l$ вершин-кандидатов на включение в X_l. Определим сначала $X_{см} = \Gamma(U_l) = \cup\, \Gamma u_k$, $u_k \in U_l$. Положив $c_k = |X_k^*|/|X_k|$, где $X_k^* \subset X_k$ — множество вершин, инцидентных ребру u_k и не принадлежащих множеству, полученному в результате объединения образов рёбер U_i, предыдущих ребру u_k в записи множества U_l. Значение $0 \leqslant c_k \leqslant 1$, где $c_k = 0$, если $\Gamma u_k \subseteq \Gamma_2(U_i)$, и $c_k = 1$, если ребро u_k не смежно ни одному из рёбер множества U_i. Считая $c_k = ... = c$ $(0 < c < 1)$ и $|\Gamma u_k|_{ср} = A$, получим:

$$N^* = A^2 \sum_{k=2}^{|U_l|} [1 + c(k-2)],$$

где N^* — количество операций сравнения вершин множеств Γu_k.

Суммарное количество операций сравнения вершин множеств Γu_k, необходимых для получения всех множеств $X_{см}$, запишется в виде

$$N_\Sigma^{**} = A^2 \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} \sum_{k=2}^{|U_l|} [1 + c(k-2)],$$

а количество элементов множества U_l:

$$|U_l| = \rho[1 + a(I - 1)].$$

Мощность множества $X_{см} = \Gamma(U_l)$ для каждого $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$ определяется выражением:

$$|X_{см}| = A[1 + c(|U_l| - 1)].$$

При каждом выполнении п. 3 количество операций сравнения для получения множества Xк равно $|X_{см}|I$. Суммируя по $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$, получим:

$$N_3 = A^2 \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} \sum_{k=2}^{|U_l|} [1 + c(k-2)] + \\ + \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} [A[1 + c(|U_l| - 1)]I],$$

т.е. асимптотическая оценка вклада п. 3 в вычислительную сложность алгоритма равна $O(n^3)$.

Оценим вклад п. 4 в вычислительную сложность алгоритма. Определение критерия выбора вершины из множества Xк по выражению $s_i = |\Gamma(X_l \cup x_i) \cap \Gamma(X \setminus \{X_l \cup x_i\})|$ потребует $K_I = |X_l| + |X|(|X_l| + 1) + (|X_l| + 1)(|X| - |X_l| - 1)$ операций сравнения элементов множеств. Или для каждого $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$

$$K_I = I + n(I + 1) + (I + 1)(n - I - 1).$$

С учётом того, что $|X\text{к}| = A\rho I^{1/2}$, и суммируя по I, получим:

$$N_4 = A\rho \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} (2n + 2nI - I^2 - 1)I^{1/2}.$$

Асимптотическая оценка вклада п. 4 в вычислительную сложность алгоритма $O(n^{7/2})$.

Выполнение п. 5 потребует не более $A\rho\Sigma I^{1/2}$, $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$, а п. 7 — $\rho\Sigma I$. Асимптотическая оценка вклада п. 5 и 7 в вычислительную сложность алгоритма $O(n^2)$.

Таким образом, асимптотическая оценка вычислительной сложности этой версии алгоритма $O(n^{7/2})$.

Приведённые исследования показывают, что наибольший вклад в вычислительную сложность алгоритма вносят п. 2, 3 — $O(n^3)$ и п. 4 — $O(n^{7/2})$.

Определение возможных способов снижения вычислительной сложности и трансформация алгоритма. Проанализируем преобразования, выполняемые в указанных выше пунктах алгоритма, после каждого включения x_t в X_l:

множество U_l рёбер, инцидентных вершинам множества X_l, и множество вершин-кандидатов Xк определяются заново (п. 2 и 3);

количество рёбер в разрезе рассчитывается для всех вершин-кандидатов (п. 4).

Рассмотрим предпосылки применения возможных оптимизирующих преобразований. Сначала проанализируем альтернативный способ определения $X_{см}$, заключающийся в нахождении $X_{см} = F_1(X_l) = \cup F_1x_j$, $x_j \in X_l$.

Поскольку гиперграф задан в форме $H(X, U, \Gamma X, \Gamma U)$, необходимо определить $F_1X = \{F_1x_i/x_i \in X\}$. Каждый образ $F_1x_i = \cup \{\Gamma u_k \backslash x_i\}$, $u_k \in \Gamma x_i$. Мощность каждого множества F_1x_i равна $|F_1x_i| = A[1 + c(\rho - 1)]$.

Для его получения, не считая операции дополнения x_i до Γu_k, необходимо выполнить

$$M_i^* = A^2 \sum_{k=2}^{|\Gamma_1 x_i|} [1 + c(k-2)]$$

операций сравнения.

Суммарное количество операций сравнения, необходимых для получения F_1X,

$$M_\Sigma^* = A^2 \sum_{k=2}^{|\Gamma_1 x_i|} [1 + c(k-2)]n.$$

Затем определяем множество $X_{см} = F_1(X_l) = \cup F_1x_j$, $x_j \in X_l$. Положив $d_j = |F_1 x_j^*|/|F_1x_j|$, где $F_1 x_j^* \subseteq F_1x_j$ — множество вершин, смежных вершине x_l и не принадлежащих вершинам множества $X_{lсм}\backslash x_j$. Значение $0 \leqslant d_j \leqslant 1$, где $d_j = 0$, если $F_1x_j \subseteq F_1(X_l/x_j)$, и $d_j = 1$, если $F_1x_j \cap F_1(X_l/x_j) = \varnothing$. Считая $d_j = d = \text{const}$ $(0 < d < 1)$, получим суммарное количество операций сравнения:

$$M_\Sigma^{**} = A^2 [1 + c(\rho - 1)]^2 \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} \sum_{j=2}^{I} [1 + d(j-2)].$$

Асимптотическая оценка M_Σ^* равна $O(n)$, а M_Σ^{**} — $O(n^3)$, так как $n_{доп} = n/L$, $n = |X|$, $L = \text{const}$ — количество частей, на которые разрезается гиперграф.

Поскольку множество X_l формируется последовательным включением вершин, множество $X_{см}$ целесообразно определять по рекуррентным формулам. Получим оценки количества операций сравнения для обоих способов.

При первом способе:

находим множество рёбер $U_i = \Gamma x_i$, $i = 1, |X_l|$;

множество $X_{lсм}$ определяем как $X_{lсм} = X_{l-1см} \cup \cup \{\cup \Gamma u_j, u_j \in U_i\}$.

Теперь суммарное количество операций сравнения, необходимых для получения первым способом всех множеств $X_{iсм}$, запишется в виде

$$N_\Sigma = \rho^2 \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} [1 + a(I-2)].$$

При втором способе:

$F_1X = \{F_1x_t/x_t \in X\}$ определяем так же, как и выше;

множество $X_{l\text{см}}$ находим как $X_{l\text{см}} = X_{l-1\text{см}} \cup F_1x_i$, $i = 1, |X_l|$.

Суммарное количество операций сравнения, необходимых для получения вторым способом всех множеств $X_{l\text{см}}$, имеет вид

$$M_\Sigma = A^2\sum_{k=2}^{|\Gamma x_i|}\left[1 + c(k-2)\right]n +$$
$$+A^2\left[1 + c(\rho - 1)\right]^2\sum_{I=1}^{n_{\text{доп}}-1}\left[1 + d(I-2)\right].$$

Асимптотические оценки для N_Σ и M_Σ равны $O(n^2)$. Как видно, количество операций сравнения, необходимых для определения $X_{l\text{см}}$, удалось сократить в n раз. Не будем сравнивать функциональные оценки вычислительной сложности для первого и второго способов определения $X_{\text{см}}$. Выполнив более глубокий анализ алгоритма и используя ограниченность параметров A и ρ, исключим определение на каждом шаге алгоритма множества U_l и будем лишь корректировать множество X_k.

Нетрудно убедиться (см. рис. 1), *что после включения вершины x_t в множество X_l могут изменить своё состояние относительно разреза только те рёбра, которые ей инцидентны.* Из этого следует:

множество Xк может измениться только за счёт вершин, инцидентных указанным рёбрам;

показатель S изменяется на величину Δs_i, где Δs_i — приращение количества рёбер в разрезе в случае включения вершины x_i в множество X_l;

показатель Δs не изменится у тех вершин-кандидатов, которые не смежны вершине x_t. Множество вершин, смежных x_t и не входящих в X_l — Xт $= F_1x_t\backslash X_l$, разбивается на два подмножества $X_{\text{т}}^* \not\subset X$к и $X_{\text{т}}^{**} \subset X$к. Для вершин подмножества $X_{\text{т}}^*$ надо подсчитывать показатель Δs (на рис. 1 это вершины x_k и x_f). Показатель Δs изменится только у тех вершин подмножества $X_{\text{т}}^{**}$, которые инцидентны хотя бы одному ребру, уходящему из разреза при включении этой вершины в X_l (на рис. 1 это вершина x_r). Будем считать, что показатель Δs изменится у всех вершин подмножества $X_{\text{т}}^{**}$. Количество вершин множества $|X\text{т}| < A\rho$, а $|X\text{к}| \leqslant A\rho I^{1/2}$.

Таким образом, нет необходимости на каждом шаге алгоритма определять U_l и Xк и рассчитывать Sк. Достаточно определять Δs_i для $x_i \in X$т и корректировать множество Rк $= \{r_i = <x_i, \Delta s_i>/x_i \in X\text{к}\}$.

На основании изложенного можно сделать заключение, что для снижения вычислительной сложности алгоритма в первую очередь следует:

количество рёбер в разрезе искать по рекуррентной формуле $S := S + \Delta s_i$;

рассчитывать показатель Δs_i только для вершин множества $X\text{т} = F_1x_t\backslash X_l$;

использовать рекуррентную процедуру для формирования множества вершин-кандидатов и их показателей Δs.

Рассмотрим определение показателя $\Delta s_i = \Delta s_i^+ - \Delta s_i^-$, где Δs_i^+ и Δs_i^- — количество рёбер множества $U_i = \Gamma x_i$, приходящих в разрез между кусками и уходящих из него в случае включения вершины x_i в множество X_l.

Из рёбер, инцидентных вершине x_i, уйдут из разреза те, которые не будут содержать вершин, принадлежащих $X\backslash\{X_l \cup x_i\}$, и появятся в разрезе ребра, все вершины которых принадлежали $X\backslash X_l$. На рис. 1 это рёбра u_j и u_l соответственно.

Для рёбер $u_j \in U_i$, уходящих из разреза и приходящих в него, формальная запись указанных выше условий имеет вид

$$X_j \cap \{X\backslash\{X_l \cup x_i\}\} = \varnothing; \quad (1)$$

$$X_j \subseteq X\backslash X_l, \quad (2)$$

где $X_j = \Gamma u_j$.

Приведённая формулировка условий неудачна. Действительно, определение $X_j \cap \{X\backslash\{X_l \cup x_i\}\}$ требует $A(I + n(I + 1))$ операций сравнения. Учитывая, что $X_l \subset X$, $|X| > |X_l|$ и $x_i \notin X_l$, целесообразно (1) записать в виде:

$$\{X_j\backslash x_i\} \subseteq X_l. \quad (3)$$

Установление истинности этого выражения потребует $A + (A - 1)I$ операций сравнения. Аналогично для рёбер, приходящих в разрез, получим:

$$X_j \cap X_l = \varnothing. \quad (4)$$

Для подсчёта Δs_i^+ и Δs_i^- необходимо выполнить следующие действия:

определить рёбра, инцидентные вершине x_i:

$$U_i = \Gamma x_i, \text{ причём } |U_i|_{\text{ср}} = |\Gamma x_i|_{\text{ср}} = \rho;$$

для каждого ребра $u_j \in U_i$ найти множество инцидентных ему вершин:

$$(\forall u_j \in U_i)\ X_j = \Gamma u_j, \text{ причём } |X_j|_{\text{ср}} = |\Gamma u_j|_{\text{ср}} = A;$$

подсчитать Δs_i^+ и Δs_i^- как количество рёбер u_j, для которых выполняются условия (4) и (3) соответственно.

С учётом того, что $I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$, вклад проверки условий (3) и (4) в асимптотическую оценку вычислительной сложности алгоритма будет равен $O(n^2)$. Используя оптимизирующее преобразование "*выбор способа задания и представления множества (подмножества)*", введём дополнительно характеристический вектор V подмножества X_I. Теперь условия (3) и (4) будут иметь вид:

$$(\forall x_r \in X_j^*)v_r = 1 \text{ и } (\forall x_r \in X_j)\ v_r = 0,$$

где $X_j^* = X_j \backslash x_i$.

Проверка условий потребует не более $A = |X_j|$ операций сравнения.

Реализация рекуррентной процедуры формирования множества вершин-кандидатов и их показателей Δs подразумевает:

удаление из множества Rк элемента, вершину которого включаем в X_I;

добавление $r_i = <x_i, \Delta s_i>$ для $x_i \in X_T^*$;

изменение значения Δs_i для $x_i \in X_T^{**}$.

На эффективность выполнения указанных действий существенное влияние оказывает структура данных для хранения множества Rк и способ его организации. Достаточно приемлемой является сортированная двоичная куча, реализованная в виде структурированного вектора [9].

Указанные выше характеристики (широкий диапазон изменения количества компонент и связей систем, для декомпозиции которых будет использоваться алгоритм, и др.) приводят к неэффективному использованию непрерывной памяти для хранения множества Rк. Таким образом, для хранения множества Rк в виде двоичной кучи целесообразно использовать двусвязный древовидный список с указателями начала и конца в комбинации с вектором прямого доступа P (рис. 2). Началом такого списка будем считать корень дерева, концом — последний лист при обходе слева-направо.

На рис. 3, 4 представлены начало и окончание схемы последовательного алгоритма разрезания гиперграфов, полученного в результате выполнения оптимизирующих преобразований. В данной версии алгоритма на каждом шаге в множество X_I включается по одной вершине гиперграфа, у которой показатель Δs

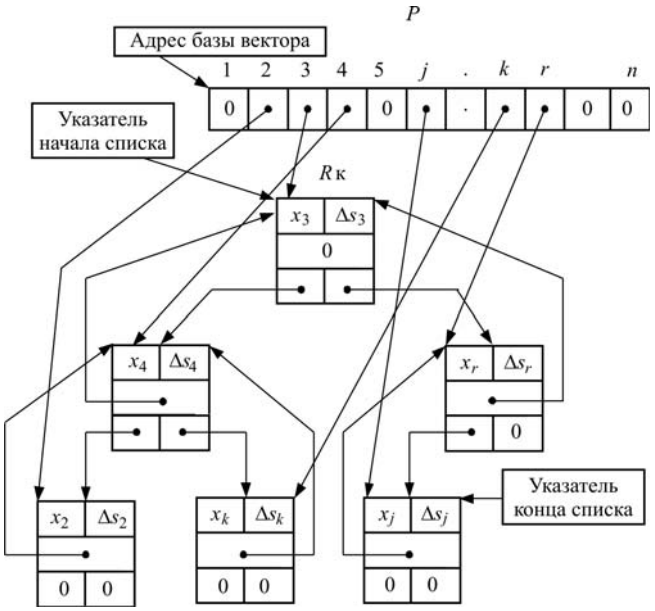


Рис. 2. Комбинированная одноуровневая структура данных — двусвязный список в виде двоичного дерева с вектором прямого доступа

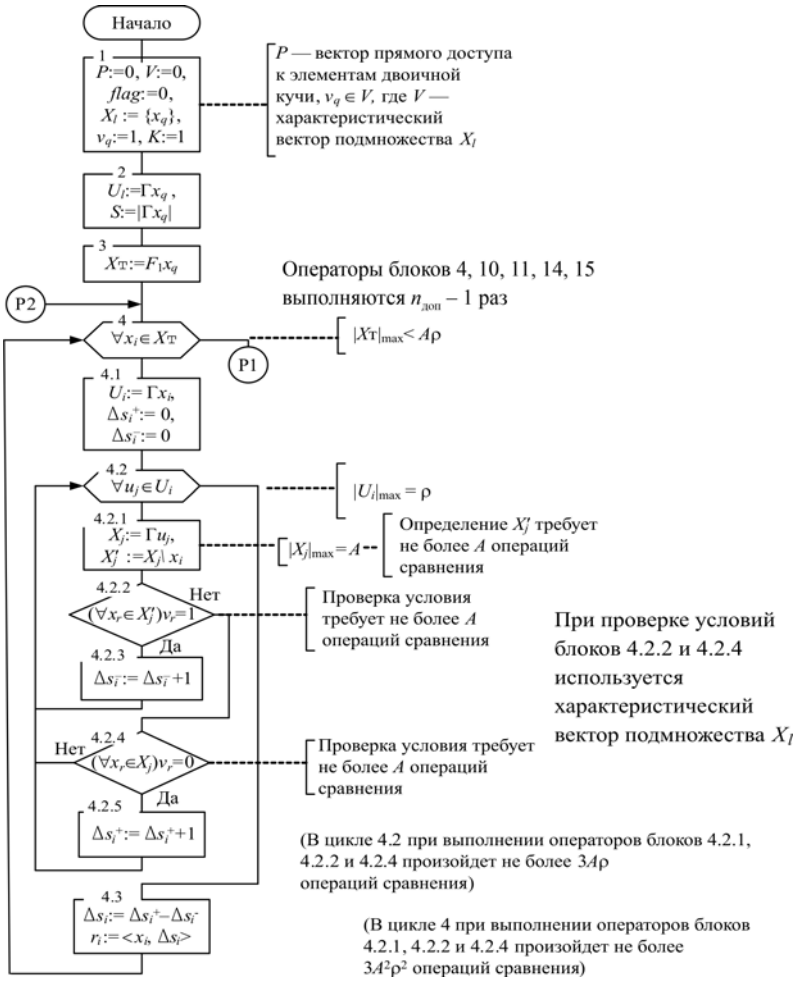


Рис. 3. Начало схемы последовательного алгоритма, полученного в результате выполнения оптимизирующих преобразований

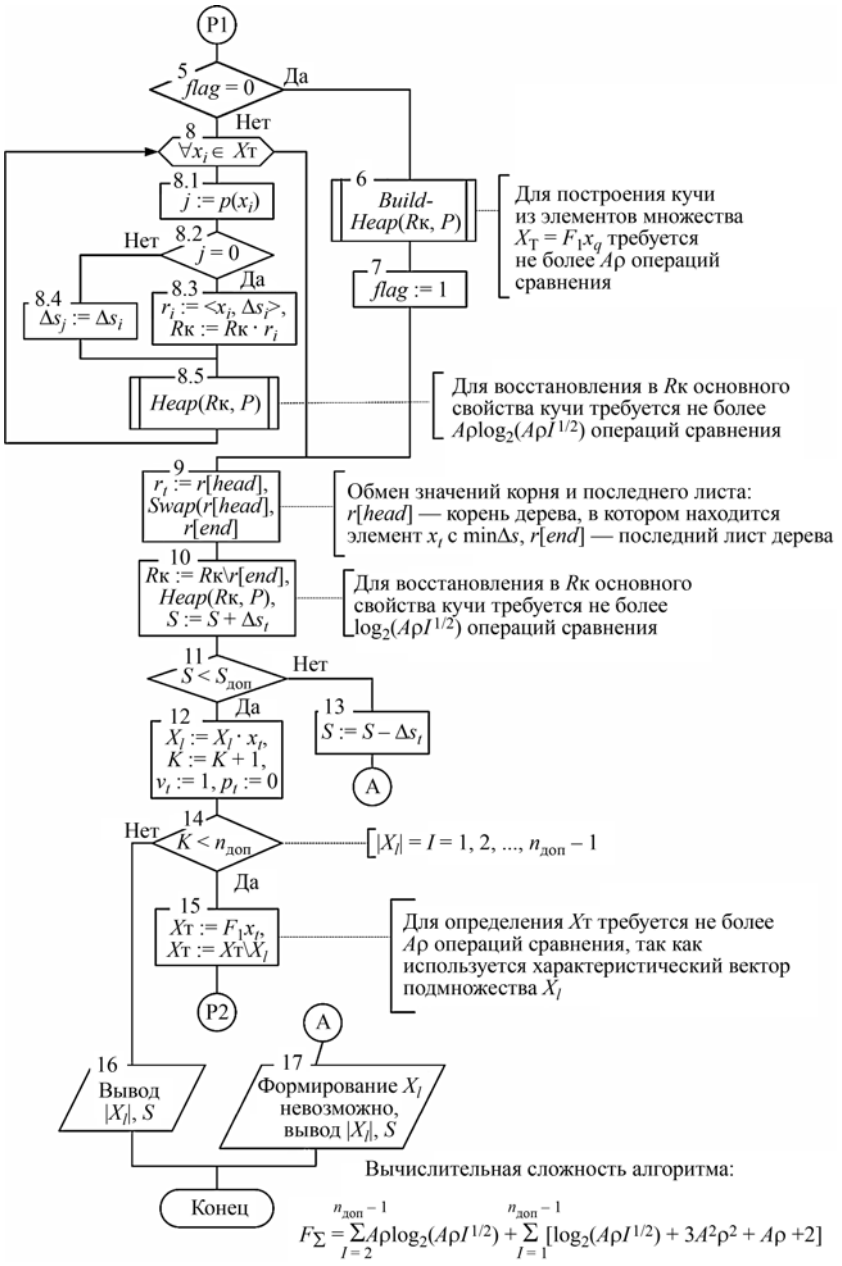


Рис. 4. Окончание схемы последовательного алгоритма, полученного в результате выполнения оптимизирующих преобразований

имеет минимальное значение. Отсюда следует что:

основное свойство кучи — "значение Δs потомков не меньше, чем у предка";

нет необходимости сортировать кучу, достаточно её один раз построить для вершин, смежных исходной вершине x_q (процедура *Build-Heap* блок 6 на рис. 4), и поддерживать основное свойство (процедура *Heap*, блоки 8.5 и 10 на рис. 4).

При этом в корневой вершине кучи всегда будет находиться $r \in R$к, с минимальным значением Δs. Адрес последнего листа необходим для обмена значений r корня и последнего листа (процедура *Swap*, блок 9 на рис. 4), его удаления и добавления r_i для $x_i \in X_{\text{Т}}^*$ в конец кучи (блоки 10 и 8.3 соответственно на рис. 4).

Асимптотическая оценка вычислительной сложности операции добавления вершины x_t в множество X_l в первой версии алгоритма (блок 7 на рис. 4) равна $O(n^2)$. На основании того, что $x_t \notin X_l$, операцию объединения заменим на операцию конкатенации (блок 12 на рис. 4).

Определение вершин, смежных x_t, при задании гиперграфа в форме $H(X, U, \Gamma X, \Gamma U)$ подразумевает реализацию выражения

$$X_{\text{Т}} = \cup \{\Gamma u_j \backslash x_t\}, \text{ где } u_j \in \Gamma x_t$$

и требует порядка $A^2\rho^2$ операций сравнения. Предполагая, что структура системы может декомпозироваться неоднократно данным либо другим алгоритмами, целесообразно использовать оптимизирующее преобразование "*выбор способа задания графа множествами*" и представить гиперграф в форме $H(X, U, \Gamma X, \Gamma U, F_1X)$.

При определении вычислительной сложности алгоритма не будем рассматривать блоки 1, 2 и 3 схемы алгоритма (см. рис. 3), так как при их выполнении не используются операции сравнения.

Оценка вкладов основных преобразований в вычислительную сложность алгоритма:

на каждом шаге алгоритма расчёт показателей Δs_i потребует не более чем $3A^2\rho^2$ операций сравнения при $I = 1, 2, ..., n_{\text{доп}} - 1$ (цикл 4, рис. 3);

построение кучи при $I = 1$ требует не более $A\rho = |X\text{т}|$ операций (блок 6 на рис. 4);

в цикле 8 (см. рис. 4) при $I = 2, 3, ..., n_{\text{доп}} - 1$, $|R\text{к}| = A\rho I^{1/2}$ происходит добавление в Rк r_i для $x_i \in X_{\text{Т}}^*$. На место, определяемое по вектору прямого доступа P, записывается $\Delta s_j = \Delta s_i$ для всех $x_i \in X_{\text{Т}}^{**}$ и восстанавливается основное свойство кучи за $A\rho\log_2(A\rho I^{1/2})$ операций;

в блоке 10 после обмена значениями между корнем и последним листом восстанавливается основное свойство кучи за $\log_2(A\rho I^{1/2})$ операций ($I = 1, 2, ..., n_{\text{доп}} - 1$);

определение $X\text{т} = F_1x_t\backslash X_l$ в блоке 15 потребует не более $A\rho$ операций, так как используется

характеристический вектор подмножества X_l ($I = 1, 2, ..., n_{доп} - 1$).

Отметим, что при использовании двоичной кучи без вектора прямого доступа P изменение значения Δs_i *для всех* $x_i \in X_T^{**}$ *потребовало бы* $|X_T^{**}|(A\rho I^{1/2} + \log_2(A\rho I^{1/2}))$ *операций за счёт поиска в R кортежа, первый элемент которого* $x_j \in X_T^{**}$. Запись адресов элементов $r_i \in R$к в вектор прямого доступа *P* происходит при работе процедур *Build-Heap* и *Heap* [9].

Пренебрегая $A\rho$ операциями при однократном построении кучи в блоке 6 и учитывая операции проверки условий в блоках 11 и 14, получим:

$$N_\Sigma = \sum_{I=1}^{n_{доп}-1} \left[3A^2\rho^2 + \log_2(A\rho I^{1/2}) + A\rho + 2\right] + \sum_{I=2}^{n_{доп}-1} A\rho \log_2(A\rho I^{1/2}).$$

Нетрудно видеть, что асимптотическая оценка вычислительной сложности последовательного алгоритма в результате применения оптимизирующих преобразований была снижена с $O(n^{7/2})$ до $O(n\log_2 n)$.

Заключение. Рассмотренные на примере трансформации последовательного алгоритма способы снижения вычислительной сложности могут быть применены и к другим алгоритмам, например параллельного разрезания, дихотомического разделения по методу ветвей и границ и итерационного улучшения [7]. Перечисленные выше преобразования дадут аналогичный эффект, так как указанные алгоритмы используют принцип последовательного формирования решения по критерию минимума количества ребер, попадающих в разрез.

Библиографические ссылки

1. **Батищев Д.И., Старостин Н.В.** К-разбиение графов // Вестник ННГУ "Математическое моделирование и оптимальное управление". 2000. № 1 (22). С. 25—37.

2. **Батищев Д.И., Власов С.Е., Старостин Н.В., Филимонов А.В.** Компоновка радиоэлектронного оборудования по блокам // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 1. С. 183—188.

3. **Топольский Н.Г., Трефилов Г.Б., Сатин А.П.** Алгоритмы многоуровневой иерархической декомпозиции гиперграфовых и графовых моделей причинно-следственных связей в АСУ безопасностью критически важных объектов // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности". 2009. № 10. URL: http://ipb.mos.ru/ttb (дата обращения 8.03.2015).

4. **Семёнов В.А., Ерошкин С.Г., Караулов А.А., Энкович И.В.** Семантическая реконсиляция прикладных данных на основе моделей // Труды ИСП РАН. 2007. № 2. С. 141—163.

5. **Karypis G., Aggarwal R., Kumar V., Shekhar S.** Multilevel Hipergraph Partitioning: Application in VLSI Domain // IEEE Transaction on Veri Large Scale Integration (VLSI) Sistems, 1999. V. 7, N. 1. P. 69—79.

6. **Батищев Д.И., Старостин Н.В., Филимонов А.В.** Многоуровневая декомпозиция гиперграфовых структур // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2008. № 2. URL: http://www.novtex.ru/IT/it2008/number05 pril.htm (дата обращения 8.03.2015).

7. **Овчинников В.А.** Алгоритмизация комбинаторно-оптимизационных задач при проектировании ЭВМ и систем: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 288 с.

8. **Овчинников В.А., Иванова Г.С.** Оценка эффективности применения операций над упорядоченными множествами // Наука и образование. Инженерное образование: Эл. науч. издание. 2011. № 10. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/239406.html (дата обращения 8.03.2015).

9. **Кормен Т., Лейзерсон Ч., Риверст Р.** Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 2000. 960 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

учебник

С.И. Богодухов, Е.С. Козик

Цена 800 р.

2015 г. 504 с. ISBN 978-5-94275-775-5

Рассмотрены вопросы кристаллического строения металлов, механические свойства, теория сплавов, диаграмма железо–углерод, углеродистые стали и чугуны, основы термической обработки, легированные стали и сплавы, инструментальные стали, цветные металлы и их сплавы. В разделе неметаллических материалов приведены основные свойства дерева, пластмасс, резины, лаков и красок, неорганических материалов.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальностям: 150205 – Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и агрегатов, 151001 – Технология машиностроения, 151002 – Металлообрабатывающие станки и комплексы, 190601 – Автомобили и автомобильное хозяйство, 240801 – Машины и аппараты химических производств.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку:
по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефону: 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 376.2

Н.А. Рачковская, д-р пед. наук, доц.
(Московский государственный областной университет)
nad1606@yandex.ru

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ЛИЦ С ОСОБЫМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ ПОТРЕБНОСТЯМИ

Исследованы технические аспекты реализации дистанционного обучения в профессиональном образовании лиц с особыми познавательными потребностями. Показана необходимость технологической модернизации системы специального образования. Описаны некоторые адаптированные периферические устройства и компьютерные программы, позволяющие лицам с инвалидностью включаться в учебную и трудовую деятельность. Рассмотрены особенности информационной культуры лиц с особыми образовательными потребностями и способы её формирования.

Ключевые слова: технология дистанционного обучения; технические средства реабилитации; профессиональное образование лиц с ограниченными возможностями здоровья; профессиональное самоопределение.

Technical aspects of the distance learning implementation at vocational education of persons with special cognitive needs are researched. The technological modernization necessity of the special education system is shown. Some adapted peripheral devices and computer programs that enable persons with disability take part in the educational labor activity are described. The information culture features of persons with special educational needs and the ways of its formation are considered.

Key words: distance learning technologies; rehabilitation technical equipment; professional education of persons with disabilities; professional self-determination.

Введение. Большинство современных философов и социологов обращают внимание на такие преимущества информационного общества, как инновационный характер производства, гуманизация технологии, утверждение класса носителей знания как основного, превалирование умственного труда и сферы услуг, возрастающая роль информации и интеллекта, которые воплощены как в людях, так и в умных машинах — эти и другие обстоятельства детерминируют особый статус образования в социальной структуре информационного общества [1, 2]. "Система образования имеет дело со знаниями, которые, превращаясь в информацию, выступают сырьём для современных технологий и производства. Образование формирует человеческий капитал, который включает в себя знания и умения, и который по своей значимости приравнивается к финансовому капиталу" [3]. Таким образом, профессиональное образование является главным источником социального капитала в постиндустриальном обществе.

Век информации предъявляет новые требования к профессиональному образованию и личности специалиста. Труд рассматривается как способ самореализации человека, утверждения своей профессиональной и индивидуальной идентичности, поэтому на первый план выходят высокая компетентность, профессиональный интерес, креативность, самостоятельность и гибкость специалиста. Повышенные образовательные требования и конкуренция на рынке труда означают, что старая модель, согласно которой молодой человек получал образование, которого хватало на всю его рабочую жизнь, становится нежизнеспособной. Социологи отмечают, что в настоящее время понятие "профессиональная ориентация", соотносящееся в большей степени с однократным выбором человеком профессии, вытесняется понятием "карьера", которое отражает весь трудовой путь человека, смену профессий, должностей и мест работы. Идея непрерывного образования постепенно завоевывает дидактический мир, что делает особенно востребованной технологию дистанционного обучения, позволяющую человеку постоянно обучаться без отрыва от производства [4, 5].

Дистанционное обучение позволяет включиться в образовательный и производственный

процессы различным категориям обучающихся, особое место среди них занимают лица с ограниченными возможностями здоровья. У людей с инвалидностью социальная изоляция вызывает патологический стресс, а образование и труд, оставаясь основными способами социализации, помогают преодолеть это деструктивное состояние. Тем более, что современные информационные и телекоммуникационные технологии привели к широкому распространению надомного труда. "Сегодня бесчисленное множество мужчин и женщин в результате сокращений на тэйлоровских фабриках работают дома, связаны с внешним миром с помощью телефона, факса, электронной почты и Интернета. Возможно, сначала они испытывают неудобство от такого изменения, потому что привыкли считать, что дом и работа должны находиться в разных местах ... нет ничего более естественного и находящегося в согласии с человеческим опытом на протяжении всей истории, чем совмещение дома и работы" [6]. Таким образом, технология дистанционного обучения полностью соответствует образовательным запросам современного человека, позволяет охватить обширную аудиторию обучающихся и удовлетворить особые познавательные потребности лиц с инвалидностью.

Технологическая модернизация системы специального образования. Длительное время присутствовало определённое беспокойство, что лица с ограниченными возможностями здоровья окажутся в арьергарде, без необходимых умений в высоко компьютеризированном обществе. Но адаптация периферических устройств к особым потребностям пользователей практически нивелировала ограничения на использование ими компьютера в процессах своего образования и реабилитации. Выносимые устройства (контакторы), приспособленные к диагнозу человека, позволяют управлять компьютерными программами независимо от состояния зрительного, слухового, тактильного анализаторов, развитости манипулятивных навыков. В настоящее время формирование информационной культуры у детей и подростков с нарушениями развития начинается уже в специальных (коррекционных) и инклюзивных школах.

Сегодня происходит масштабная технологическая модернизация специального образования на основе применения компьютера в качестве главного инструмента коррекционно-развивающего обучения и реабилитации школьников. Оснащение учебных заведений, а также детей, обучающихся на дому, компьютерной техникой, подключённой к сети Интернет, позволило учащимся с ограниченными возможностями здоровья вне зависимости от региона проживания получить доступ к качественному образованию с учётом их диагноза. "В стране сложились условия для развертывания "технопарка", ориентированного на создание "индустрии" наукоёмких отечественных компьютерных технологий обучения детей с ОВЗ (особыми образовательными потребностями) с методическим сопровождением для педагогов и родителей" [2].

Целесообразность использования информационных технологий в обучении детей с нарушениями развития обусловлена своеобразной "модульностью" головного мозга человека, выявленной в процессе нейрофизиологических исследований. "Мозг — это специализированный набор модулей. Наиболее известные модули мозга — это левое и правое полушария коры, которые выполняют частично специализированные, а частично совпадающие функции. Существуют также специализированные модули речи, зрения, музыки, принятия решений и даже морального выбора" [6]. Влияние на определённые модули мозга позволяет компенсировать неразвитые или утраченные функции других модулей. Особенно эффективно такое замещение происходит в сензитивные периоды детского возраста. Это доказывает необходимость включать компьютерные технологии в коррекционно-образовательный процесс в связи с их значительным развивающим эффектом и побуждает инженеров разрабатывать и модифицировать уже существующие технические устройства и программное обеспечение.

Информационная культура лиц с особыми познавательными потребностями. Сформированная информационная культура личности представляет собой своеобразную подсистему, предполагающую готовность и умения человека воспринимать, собирать, хранить, обрабатывать и использовать информацию из различных источников для осуществления учебной и трудовой деятельности.

Информационная культура и способы её формирования у людей с ограниченными возможностями здоровья специфичны. Так, известно, что развитая информационная культура позволяет личности формировать целостную, адекватную и динамичную картину мира, упорядоченную во времени и пространстве. Это чрезвычайно важно для людей с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата, у которых представления о жизни за порогом их квартиры или интернатного учреждения весьма скудны. "Компьютер и электронные устройства, разработанные на его основе, являются уни-

кальным средством, предоставляющим возможность детям с ограниченными возможностями здоровья вне зависимости от степени их мобильности общаться с окружающим миром, овладевать всей совокупностью знаний, накопленных человечеством на протяжении тысячелетий" [1].

Проблема использования технических средств для формирования адекватной картины мира у незрячих и слабовидящих людей до сих пор остаётся открытой, хотя инженерные, медицинские и психологические исследования в этом направлении не прекращаются.

Люди, больные аутизмом, имеют особую картину мира, не всегда доступную пониманию окружающих. Программисты, опираясь на имеющиеся сведения о данном заболевании, смоделировали визуально-аудиальный ряд, соответствующий мировосприятию аутиста, чем привлекли внимание общества к проблемам поведения и коммуникации людей с аутизмом.

Информационная культура делает возможным эффективно осуществлять поиск информации, оценивать её с точки зрения надёжности и полезности, отбирать, сохранять и передавать, что позволяет человеку с инвалидностью включаться в образовательный процесс при наличии адекватной технической поддержки.

Клавиатура и мышь, как основные средства ручного ввода информации, наиболее часто подвергаются модификации. Следует отметить, что функцию ввода информации могут выполнять практически все подвижные части тела, на которые крепится специальная пластина с электронным устройством, улавливающим даже незначительные движения для инициирования определённых операций.

Изменения клавиатуры затрагивают её размеры, количество кнопок и настройку функций. Так, большие клавиатуры с уменьшенным количеством кнопок и увеличенными размерами предназначены для пользователей, испытывающих проблемы с точностью движений. В данном случае помочь в работе могут накладки на клавиатуру, которые упрощают доступ к ней или объединяют несколько функциональных клавиш. Уменьшенные клавиатуры с близко расположенными клавишами необходимы, когда человек затрудняется выполнять движения большой амплитуды. Существуют бесклавишные клавиатуры, состоящие из двух вращающихся кругов, которые управляются поверхностью ладони без участия пальцев. Виртуальная клавиатура воспроизводится на экране монитора и может управляться с помощью мыши. Сенсорные клавиатуры имеют поверхность, чрезвычайно восприимчивую даже к незначительным прикосновениям.

Мышь также имеет большое количество модификаций, предназначенных для пользователей, которые не могут работать с помощью рук. Ножная мышь позволяет управлять курсором путём нажатия на специальную клавишу вверх-вниз и вправо-влево. Мышь, управляемая движением головы, представляет собой беспроводное оптическое следящее сенсорное устройство, которое фиксирует движения головы для управления курсором на экране компьютера.

Для людей с ограниченными возможностями здоровья специально разрабатывается или адаптируется программное обеспечение. Многие программы совместимы с системой Windows, что делает их доступными для большого количества пользователей. Обучающимся с ограниченными возможностями здоровья и специалистам известны программы голосового и неголосового ввода информации, обеспечивающие достаточно комфортную коммуникацию в процессе обучения. Программы голосового ввода информации (распознавания речи) позволяют человеку “бесконтактно” общаться с компьютером, поэтому востребованы пользователями с нарушениями опорно-двигательного аппарата, которые испытывают трудности в манипулятивной деятельности. Голос человека распознается и преобразуется в текстовую информацию и команды, управляющие операционной системой. Программы неголосового ввода информации позволяют создать текстовое или графическое сообщение, из которого впоследствии можно синтезировать голосовое высказывание. Словари этих программ содержат более тысячи слов и фраз, удовлетворяющих актуальные коммуникационные потребности пользователя. Выступая в качестве альтернативного средства коммуникации, программы неголосового ввода информации успешно применяются не только в обучении людей, не владеющих устной речью, но и в реабилитационной практике.

Информационная культура пользователей с особыми образовательными потребностями предполагает информационную психогигиену, которая означает способность человека к саморегуляции информационных процессов в соответствии с актуальным состоянием организма. У людей с ограниченной мобильностью велик соблазн длительное время проводить за монитором компьютера, что приводит не только к виртуализации сознания, но и к ухудшению физического самочувствия. В этой связи необходимо рациональное сочетание труда и отдыха,

а также система мер по укреплению физического здоровья пользователя с инвалидностью.

Информационная психогигиена заключается в способности человека осуществлять информационно-психологическую самозащиту, ограждать себя от негативной информации. Существуют сайты, где общаются и публикуют свои жизненные истории лица с различными формами умственной отсталости и аутизма, у которых эта способность снижена. Модераторы данных сайтов внимательно следят за тем, чтобы оградить эту категорию пользователей от нежелательных виртуальных контактов и деструктивной информации, которая может дестабилизировать их и без того зыбкое психоэмоциональное состояние.

Информационная культура позволяет человеку с ограниченными возможностями здоровья творчески воспринимать и использовать информацию для воплощения своих идей, развития способностей и талантов, например, в сфере веб-дизайна, создания сайтов, компьютерной графики, цифровой полиграфии, видеомонтажа и др. Со временем для некоторых пользователей это становится не только интересным хобби, но и источником дополнительного заработка или даже профессией.

Компьютерные технологии и профессиональное самоопределение лиц с ограниченными возможностями здоровья. Лица с инвалидностью при построении и реализации своих профессиональных перспектив сталкиваются с множеством проблем, наиболее распространённые из них: недостаточное осознание своих возможностей в сфере труда и образования, затрудненное взаимодействие с учебными заведениями и предприятиями, сложности трудоустройства и многие другие. Люди с ограниченными возможностями здоровья в процессе своего профессионального самоопределения остро нуждаются в техническом и психолого-педагогическом сопровождении, причём речь идет не о разовой помощи при первоначальном выборе профессии, а о постоянной поддержке в профессиональном развитии.

Психолого-педагогическое сопровождение осуществляют консультанты центров построения карьеры, созданных при университетах и колледжах; специалисты служб занятости; персонал отделов кадров предприятий; работники общественных и религиозных организаций; волонтёры. Они реализуют информирование, тестирование, консультирование лиц с особыми потребностями, участвуют в разработке индивидуальных планов профессионального развития, а при необходимости помогают людям с инвалидностью собрать документы для поступления в вуз или составить резюме при трудоустройстве.

Интернет не только дополняет деятельность данных служб, но и является самостоятельным источником поддержки, представляя собой обширнейшую базу полезной информации по профессиональному образованию и самоопределению. Интернет оказывается удобным с точки зрения доступности его профориентационной поддержки лицам с низкой мобильностью, проживающим в отдалённой местности. Многочисленные популярные информационно-поисковые системы Интернета позволяют найти исчерпывающие сведения о любом колледже или вузе, посмотреть сайт учебного заведения, получить информацию о стипендиях и предложениях работы. Кроме того, Интернет позволяет студентам и преподавателям дистанционно осуществлять переговоры и консультирование в режиме реального времени, обеспечивает определённую анонимность, что для замкнутых и неохотно идущих на личный контакт людей нередко оказывается решающим фактором.

Таким образом, Интернет представляет собой мощный ресурс для людей с ограниченными возможностями здоровья, позволяющий им увеличить свою профессиональную состоятельность, экономическую независимость и интегрироваться в общество.

Выводы. Информационное общество предъявляет высокие требования к личности и профессионализму специалиста, что побуждает человека на протяжении всей трудовой жизни повышать свою квалификацию, проходить переподготовку и получать дополнительное образование. Компьютерные технологии позволяют воплотить в жизнь идею непрерывного образования без отрыва от производства. Технология дистанционного обучения даёт возможность людям с ограниченными возможностями здоровья получить качественное профессиональное образование и включиться в трудовую деятельность.

Это становится возможным благодаря технологической модернизации системы специального образования, которая заключается в разработке и адаптации периферических устройств и компьютерных программ к особым потребностям пользователей с инвалидностью. На сегодняшний день компьютеры выступают в качестве одного из главных средств коррекционно-развивающего обучения и реабилитационного процесса.

Использовать в полной мере все возможности компьютерного обучения может пользователь с развитой информационной культурой,

которая должна формироваться ещё в специальных школах и инклюзивных учреждениях.

Информационная культура человека с особыми познавательными потребностями предполагает умение с помощью адаптированных технических средств осуществлять эффективный поиск информации, оценивать её надёжность и полезность, отбирать, сохранять и передавать информацию. Информационная культура пользователей с инвалидностью заключается в способности человека регулировать время пребывания за компьютером в соответствии со своим самочувствием и осуществлять психологическую самозащиту от деструктивной информации. Данная подсистема личности даёт возможность человеку с ограниченными возможностями здоровья творчески использовать полученную информацию для осуществления планов, идей и презентации себя окружающему миру.

Библиографические ссылки

1. **Кроткова А.В.** Использование технических средств в психолого-педагогической и социальной реабилитации детей с нарушениями опорно-двигательного аппарата // Обучение и воспитание детей с нарушениями развития. 2014. № 6. С. 13—21.

2. **Малофеев Н.Н.** Научные основы модернизации специального образования // Педагогика. 2009. № 3. С. 9—17.

3. **Силичев Д.А.** Социальные последствия перехода от индустриализма и модерна к постиндустриализму и постмодерну // Вопросы философии. 2005. № 7. С. 3—20.

4. **Александров А.А., Абрамешин А.Е., Мешков Н.А., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Разработка и исследование системы управления инновационным развитием российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество. Инновации. Образование. 2012. № 10 (89). С. 2—15.

5. **Александров А.А., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шарков А.А.** Концепция комплексного непрерывного обучения с использованием инновационных информационных технологий // Научное обозрение: гуманитарные исследования. 2012. № 4. С. 38—42.

6. **Фукуяма Ф.** Великий разрыв. М.: ООО "Издательство АСТ": ЗАО НПП "Ермак", 2004. 474 с.

УДК 681.513

А.А. Александров, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пролетарский**, д-р техн. наук, проф.,
К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Ван Сяофэн, д-р техн. наук, проф., **Хэ Юн**, д-р техн. наук, проф., **Кай Шэнь**
(Нанкинский университет науки и технологии, КНР)

neysipin@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ

Представлены исследования по разработке и внедрению новых методов обучения в области комплексной непрерывной профессиональной подготовки абитуриентов, бакалавров, магистров, специалистов, повышения квалификации инженерных и научных кадров, а также послевузовской подготовки специалистов высшей квалификации по инженерным специальностям.

Ключевые слова: образовательное пространство; непрерывное обучение; интенсивные технологии; абилитация; инженерные специальности.

Research on the development and introduction of new teaching methods in the sphere of complex continuous training university entrant, bachelors, masters, experts, skill improvment of engineers and scientist personnels, as well as postgraduate training of highly qualified specialists in engineering are presented.

Key words: educational environment; continuous teaching; intensive technologies; habilitation; engineering specialities.

Введение. МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинский университет науки и технологии (КНР) осуществляют подготовку высококвалифицированных специалистов, отвечающих современным запросам инновационной экономики, проведение фундаментальных и поисково-прикладных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Быстроменяющееся современное общество выдвигает новые требования к образовательному процессу. Профессиональное образование и обучение должны быть ориентированы на подготовку специалиста, способного обеспечить прогресс в развитии в своей отрасли. Современный рынок труда требует работника нового типа: разносторонние знания, отличная специальная подготовка, активная жизненная позиция, способность адаптироваться к новым ситуациям, к постоянным изменениям, знание иностранных языков, новых информационных технологий, готовность развивать знания и адаптировать их к новым ситуациям — всё это говорит о том, что образование должно быть ориентировано на опережающее обучение специалиста, постоянное образование, широкие знания.

В условиях интенсивного развития производительных сил, сопровождаемого массовым применением новых технологий, изменилось само понятие квалификации работников (их способности выполнять ту или иную работу). Если раньше общественное признание имела квалификация, полученная в процессе специального профессионального обучения, а затем обогащённая опытом рутинной работы, то в настоящее время требования к квалификации работников кардинально изменились.

Состояние образовательного пространства и перспективы развития. Можно выделить следующие современные требования, на которые необходимо ориентироваться в профессиональной деятельности:

образованность: высшее образование; практические навыки и умения; знания в своей предметной (профессиональной) области; опыт работы и достижения в конкретной области деятельности; знания в смежных профессиональных областях; стремление постоянно обогащать свои знания;

социализированность: коммуникативные свойства, культура труда и общения; инициативность, готовность к активной профессиональной и социальной деятельности; умение ориентироваться в быстроизменяющемся информационном поле;

индивидуальные качества: готовность к созидательному труду; творческие способности; умение аналитически мыслить; сформированность памяти и мышления; саморазвитие и самовоспитание.

Однако на сегодняшний день существует ряд противоречий образовательного, профессионального, экономического и социального характера между:

базовой школьной подготовкой и требованиями вузов к абитуриентам;

склонностями обучающихся, их способностями и требованиями к избираемой профессии;

осознанием уровня своего общего развития и возможностью менее квалифицированной работы;

притязаниями личности и реальными возможностями заполнения вакантных мест;

определённой способностью каждого конкретного человека и представлением о престиже профессии;

желанием заранее попробовать себя в избираемой профессиональной деятельности и отсутствием таковой возможности в школе и ближайшем её окружении;

несоответствием здоровья, характера, привычек требованиям, предъявляемым профессией и др.;

запросами обучающихся на высокое качество профессиональной подготовки, обеспечивающих их конкурентоспособность на рынке труда, и применяемыми образовательными технологиями, которые не могут удовлетворить потребность в обучении. Студенты, школьники, безработные граждане и незанятое население хотят получать дополнительное образование, их интересы смещены сейчас в область экономики, менеджмента, юриспруденции;

динамикой спроса рынка труда на специалиста определённого профиля и традиционно сложившейся структурой их подготовки;

ограниченностью платёжеспособного спроса на образовательные услуги и ростом числа желающих в короткие сроки и с минимальными затратами на основе практического опыта и собственного источника самообучения и готовности к нему решить задачи саморазвития личности и проблему повышения конкурентоспособности на рынке труда путём переподготовки в системе дополнительного профессионального образования с использованием современных образовательных технологий;

возросшими требованиями к современному специалисту и действующими формами и методами, сложившимися на основе представлений

об экстенсивных путях развития промышленности и её кадрового обеспечения;

профессиональными планами молодёжи с высоким уровнем образования и экономической необходимостью промышленности заполнить вакантные рабочие места с тяжёлым физическим трудом;

потребностью учебных заведений и других социальных институтов в специалистах и отсутствием стабильной комплексной подготовки их в вузах России и Китая;

необходимостью координации и интеграции профориентированных воздействий и решением её узковедомственными путями и средствами.

Для разрешения сформулированных выше противоречий, обеспечения повышения квалификации и подготовки специалистов представляется необходимым:

усилить влияние промышленности на образовательный процесс за счёт участия в формировании и коррекции запроса на подготовку по конкретным специальностям и квалификациям (бакалавр, специалист, магистр);

разработка новых образовательных стандартов нового поколения и образовательных программ с привлечением работодателей; развитие системы отраслевых факультетов на территории базовых предприятий; формирование системы общественно-профессиональной аккредитации вузов;

усиливать материально-техническую базу вузов, обеспечивать производственные практики, соотносить темы научно-исследовательской работы (НИР) студентов, курсовых и дипломных проектов с реальными задачами промышленности;

осуществлять научно-исследовательское сотрудничество между вузами и предприятиями;

при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (ОКР) промышленными предприятиями включать в работу высшие учебные заведения;

обеспечивать взаимную научную и обучающую интеграцию между вузами и предприятиями;

содействовать в обеспечении повышения квалификации, переподготовки, стажировки, второго высшего образования для сотрудников предприятий.

Для реализации поставленных целей и решения сформулированных конкретных задач в МГТУ им. Н.Э. Баумана (РФ) и в Нанкинском университете науки и технологии (КНР) разработана комплексная концепция непрерывной профессиональной подготовки с использованием инновационных, информационных и дистанционных технологий, а также организована совместная международная лаборатория.

Образовательные и научные задачи удобно реализовать в рамках совместной международной лаборатории (МЛ). МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинским университетом науки и технологии была создана МЛ "Интеллектуальные электромеханические системы" (МЛ "ИЭС"), основная цель деятельности которой — создание научно-инженерной школы мирового уровня и на её основе развивать научно-исследовательскую деятельность по разработке новых научных решений и технологий, их применение и подготовку высококвалифицированных специалистов соответствующего профиля.

Главными задачами МЛ "ИЭС" являются:

привлечение к работе в МЛ "ИЭС" крупных учёных в качестве научных руководителей творческих коллективов молодых исследователей для решения актуальных и перспективных проблем техники, технологий и образовательных программ в рамках инновационных проектов;

развитие и координация фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинском университете науки и технологии;

повышение на базе МЛ "ИЭС" уровня фундаментального образования и инженерной подготовки кадров молодых специалистов. Организация новых лекционных курсов с приглашением ведущих учёных, подготовка новых учебников, монографий, учебных методических пособий, новых лабораторных работ, использование новейших научных достижений в курсовом и дипломном проектировании студентами, участвующими в выполнении НИР и ОКР. Подготовка нового поколения молодых учёных благодаря привлечению аспирантов к выполнению научной тематики МЛ "ИЭС". Активное привлечение аспирантов и студентов к участию в международных семинарах, конференциях, симпозиумах, организация стажировок молодых учёных и специалистов на базе ведущих мировых научных центров и университетов;

создание и использование профильных научно-исследовательских стендов, тренажёров, оснащённых современным оборудованием, измерительными приборами, средствами вычислительной техники, устройствами многоканальной высокоскоростной связи и отображения информации;

развитие международного сотрудничества в областях научно-исследовательской и образовательной деятельности, выполнение совмест-

ных научных работ с зарубежными партнёрами в рамках международных проектов и на основе двухсторонних соглашений в том числе в виде контрактов;

создание базы для прохождения практики иностранных студентов и аспирантов;

организация и проведение международных научно-технических конференций, симпозиумов, конкурсов, семинаров, выставок по направлениям деятельности МЛ "ИЭС";

создание на базе МЛ "ИЭС" современного лабораторного практикума для студентов и аспирантов из Нанкинского университета науки и технологии, обучающихся в МГТУ им. Н.Э. Баумана, обеспечение режима удалённого доступа к этому практикуму;

организация НИР студентов и аспирантов по тематике научных направлений деятельности МЛ "ИЭС";

пропаганда и популяризация знаний в области инженерных наук и передовых информационных технологий, создание, совместного научного журнала;

привлечение дополнительных ресурсов для развития и укрепления материально-технической и научно-методической базы МЛ "ИЭС";

проведение работ по созданию совместной интеллектуальной собственности (получение патентов);

совместное участие в конкурсах, грантах, премиях и научных фондах.

Разработанная образовательная концепция предусматривает комплексную непрерывную профессиональную подготовку абитуриентов, бакалавров, магистров, специалистов, повышение квалификации инженерных, научных и педагогических кадров, а также послевузовскую подготовку специалистов промышленных комплексов России и Китая.

Реализация методов и форм образовательного процесса, составляющих разработанную концепцию подготовки и переподготовки, осуществляется по интегративной системе непрерывного образования "школа — вуз — аспирантура — переподготовка и повышение квалификации — предприятие". Отличительной особенностью концепции является использование "русского метода" и инновационных информационных технологий в большом объёме, что привело к трансформации и глубоким изменениям в образовательном процессе.

В результате проведения работы в настоящее время в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинском университете науки и технологии разработаны и адаптированы к учебному процессу новые концептуальные методы в подготовке и переподготовке специалистов по целому ряду высокотехнологических направлений.

В рамках концепции осуществляется проведение целевой подготовки абитуриентов (согласно программе "Шаг в будущее"), бакалавров, магистров, специалистов, аспирантов, слушателей второго высшего образования, повышения квалификации и переподготовки кадров, их абилитация на предприятиях национальных индустриальных комплексов России и Китая.

Концепция предусматривает реструктуризацию учебного процесса научно-учебного центра университета на основе гибридных и виртуальных технологий [1, 2]; интеграцию учебного, научного и прикладного процесса в университетском техническом образовании, реализующую "русский метод" обучения; непрерывность образовательного процесса, обеспечиваемого многоуровневыми системами университетского технического образования; использование высоких информационных беспроводных технологий, мультимедийных средств, которые положены в основу очно-заочных и дистанционных форм обучения.

Реализация концепции обеспечивает непрерывную подготовку школьников, проходящих углублённую профессиональную ориентацию по выбранной специальности, подготовку по программе "Шаг в будущее"; студентов соответствующих специальностей с использованием "русского метода" обучения, предусматривающего постоянное подтверждение полученных теоретических знаний на практике; аспирантов очной и заочной форм обучения; слушателей второго высшего профессионального образования по различным направлениям, получающих квалификацию бакалавр техники и технологии или магистр техники и технологии; работников промышленных предприятий, проходящих профессиональную переподготовку.

Разработаны и реализованы инновационные информационные компоненты концепции: модель виртуального университета, методики и модели непрерывной целевой подготовки, методики дистанционных форм обучения, адаптированные беспроводные технологии.

Симбиоз современных информационных технологий и "русского метода" в обучении позволяет получить синергетический эффект, что является инновационным преимуществом по сравнению с другими образовательными концепциями за счёт ускорения и более качественного усвоения материала.

Все этапы обучения предполагают использование дистанционных форм подготовки. Разра-

ботаны методики реализации дистанционного обучения в рамках проведения самостоятельной работы абитуриента, студента, слушателя и аспиранта. Дистанционные формы подготовки широко используют беспроводные технологии, адаптированные для специфических требований учебного процесса. В рамках концепции построены унифицированные информационные модели методического обеспечения учебного процесса.

Концепция разработана для группы близких взаимосвязанных и взаимодополняющих направлений подготовки, включает сбалансированные программы обучения и учебные планы.

Комплексная концепция обучения позволяет реализовать функцию абилитации, которая обеспечивает, наряду с обучением и образованием, комплексную подготовку человека к профессиональной деятельности, а также его профессиональную самореализацию.

Успешность деятельности обучаемого на всех этапах подготовки определяется не только высоким уровнем знаний, продуктивным владением методами познания и деятельности, но и комплексной подготовкой к профессиональной работе.

Совершенствование процесса подготовки путём увеличения доли используемых информационных интеллектуальных технологий, накопленных информационных ресурсов в виде баз данных и знаний, информационно-логических моделей, средств глобального телекоммуникационного общения обеспечивают возможности для создания сложных систем в творческой лаборатории одной личности.

Использование технологий подготовки в рамках виртуального университета предусматривает реализацию принципа дифференциации образования. Система образования представляет собой сложный неоднородный объект стандартизации, требующий декомпозиции на более простые и однородные составляющие. В качестве таких составляющих принимаются следующие объекты: системы образования (моноструктура, многоступенчатая структура, многоуровневая структура); направление подготовки, специальности, выпускные квалификации на всех ступенях и уровнях; цикличность содержания подготовки (математический цикл, физический цикл и т.д.); типы составляющих подготовки (гуманитарная, общеобразовательная, фундаментальная общенаучная, фундаментальная общетехническая, специальная); типы инвариантов подготовки и усвоения циклов дисциплин (инварианты: профессиональный, базовый, пользовательский, ознакомительный). Варьирование учебными дисциплинами осуществляется в рамках вузовской компоненты образовательного стандарта и отражает не только особенности научных школ, традиции, опыт и понимание вузовским сообществом современного уровня подготовки специалистов, но и особенности текущей ситуации на рынке интеллектуального труда России и Китая.

На современном этапе развития образовательных систем всё большей популярностью пользуются технологии виртуального университета, структура которого максимально отвечает запросам информационного общества. Технологии виртуального университета применены к системе непрерывного образования, которая реализует цепочку подготовки "школа — вуз — аспирантура — повышение квалификации — дополнительное образование — предприятие".

Следует отметить, что реальная творческая лаборатория абилитации личности расположена не только в пространстве учебно-научной деятельности университета, но и за её пределами и даже за пределами образовательного учреждения. Самодеятельные и внеинституциональные формы абилитации дополняют и в некоторых случаях оказываются определяющими для становления личности. Выход из пространства образовательного учреждения реализуется с помощью беспроводных сетевых технологий и позволяет проводить вебинары, лабораторные работы с помощью компьютерных программ-эмуляторов или программ-тренажёров в дистанционной форме, консультации в режиме on-line, контроль качества усвоения материала.

Реализация учебного процесса с учётом функции абилитации, обеспечивающей наряду с обучением и образованием комплексную подготовку человека к профессиональной деятельности, а также его профессиональную самореализацию [2—4].

Задача абилитации обучающегося решена посредством прогнозирования индивидуальной профессиональной траектории, использования в образовательных программах функциональных элементов адаптации к будущей профессиональной деятельности и применением "русского метода" на всех этапах непрерывного обучения.

Становление профессионала предполагает выход из пространства знаний в пространство деятельности и жизненных смыслов.

Успешность деятельности обучаемого на всех этапах подготовки определяется не только высоким уровнем знаний, продуктивным владением методами познания и деятельности, но и

комплексной подготовкой к профессиональной работе.

Совершенствование процесса подготовки путём увеличения доли используемых информационных интеллектуальных технологий, накопленных информационных ресурсов в виде баз данных и знаний, информационно-логических моделей, средств глобального телекоммуникационного общения обеспечивают возможность создания сложных систем в творческой лаборатории одной личности.

Использование виртуальных технологий в образовательном процессе. Обучающемуся предстоит реализовывать свои знания, умения и навыки в условиях современного информационного общества [5].

Информационное общество — модель, используемая для описания качественно нового этапа общественного развития, в который вступили развитые страны с началом информационно-компьютерной революции. Технологическим основанием общества становятся не индустриальные, а информационные и телекоммуникационные технологии (ИТТ).

Информационное общество — это общество, в котором информация становится главным экономическим ресурсом, а информационный сектор выходит на первое место по темпам развития, числу занятых, доле капиталовложений, доле во внутреннем валовом продукте. ИТТ становятся главным средством повышения эффективности производства, укрепления конкурентоспособности как на внутренних рынках России и Китая, так и на мировом рынке. Происходит перераспределение ресурсов в пользу науки и образования. В развитых странах так называемый накопленный человеческий капитал в три раза больше активов всех местных корпораций. Основной формой собственности становится интеллектуальная собственность. В конкурентной борьбе за мировое первенство появляется новый фактор — уровень развитости информационной инфраструктуры и индустрии. Информация становится предметом массового потребления. Информационное общество обеспечивает любому индивиду доступ к любому источнику информации.

Информационное общество характеризуется значительными скоростями развития и внедрения новых информационных технологий, что определяет основные требования к формированию современной системы образования. Основным становится быстрота внедрения образовательных программ в учебный процесс. В этом смысле разрабатываемые образовательные стандарты линейного образовательного процесса становятся тормозом развития информационного общества. В рамках первого высшего образования, определяя его как классическое фундаментальное, медлительность замены учебных программ определяет глобальное отставание в ИТТ. И только фундаментальность компенсирует в данном случае недостатки в скорости развития, перенося изучение новых информационных технологий в раздел самостоятельной работы по желанию самого студента.

Возможным способом решения перечисленных проблем является разработка и внедрение новой системы образования, основанной на нелинейности образовательного процесса на основе блочно-модульной структуры, предполагающей определение глобального направления обучения, которое начинается с изучения опорных дисциплин, сформированных на основе линейного учебного плана, продолжительностью 3—4 семестра. И только потом, с учётом потребностей информационного общества и рынка труда, формируется учебный план для специалиста по конкретному направлению [6]. При этом возможен и допустим возврат к более глубокому изучению ранее рассмотренных дисциплин. Формирование такого образовательного тренда возможно лишь при блочно-модульном пространстве образовательных дисциплин. В этом случае возможна оптимизация движения по образовательному пространству с учётом желаний и возможностей самого обучаемого, потребностей государства и общества. К разработке модулей необходимо привлекать крупных вендоров, которые заинтересованы в получении специалистов для работы на современном оборудовании и обладающих знаниями в ИТТ, а само образование не является их основным видом деятельности. Представляется возможным получение образования и в условиях неопределённого времени обучения. В этом случае изучение конкретных дисциплин подтверждается сертификатами (это могут быть и сертификаты вендоров, что значительно повышает конкуретность выпускника на рынке труда), а при достижении определённого объёма прослушанных курсов (определяется модулем образовательного вектора с учётом весов конкретных дисциплин) студент может представить итоговую работу аттестационной комиссии, которая принимает решение о присуждении соответствующей квалификации.

При подготовке бакалавров, магистров и инженеров варьирование учебными дисциплинами осуществляется в основном в рамках вузов-

ской компоненты образовательного стандарта и отражает не только особенности научных школ, традиции, опыт и понимание вузовским сообществом современного уровня подготовки специалистов, но и особенности текущей ситуации на рынке интеллектуального труда.

Суть концепции комплексной инженерной подготовки. Реализация научных основ концепции непрерывного обучения осуществлена в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в рамках программы "Шаг в будущее", в научно-образовательных центрах и институтах МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на факультетах Нанкинского университета науки и технологии и в рамках совместных образовательных проектов.

Методы и формы реализации образовательного процесса, составляющих разработанную концепцию, предусматривают подготовку и переподготовку по интегративной системе непрерывного образования "школа — вуз — аспирантура — институт повышения квалификации — дополнительное профессиональное образование — предприятие". Отличительной особенностью предлагаемой концепции является использование "русского метода" в обучении и инновационных информационных технологий в большом объёме, что привело к трансформации и глубоким изменениям в образовательном процессе.

Концепция непрерывного обучения с использованием информационных технологий носит универсальный характер и использована на разных стадиях обучения граждан России, Китая, Казахстана, Вьетнама и др. Одной из базовых составляющих концепции является "русский метод" обучения [7, 8].

Концепция представляет собой многоуровневую систему, реализация которой предъявляет определённые требования к структуре и организации профессионально-образовательного процесса в техническом университете, которые на основе анализа отечественного и зарубежного опыта могут быть сведены к следующему [9]: модульность и безтупиковость профессионально-образовательной системы; модульность структуры учебных курсов, наличие обязательных модулей свободного и ограниченного выбора; динамизм, систематическое обновление содержания модулей учебных курсов и гибкость при стабильной их структуре; индивидуальность форм обучения (традиционная, экстернат, включённое обучение, продолженное обучение, сэндвич-технология, информационная технология и т.д.); рейтинговая система оценки и аттестации результатов обучения; организация специальных служб, способствующих реализации функции абилитации.

Современный этап развития образовательных программ предусматривает использование интенсивных технологий обучения (ИТО), обеспечивающих существенное повышение интенсивности обучения за счёт сокращения времени на освоение заданного объёма знаний, увеличения объёма знаний при заданном времени на их освоение; использования перечисленных факторов одновременно.

Для технических университетов характерны следующие ИТО: компьютерные; базирующиеся на графических и матричных методах сжатия информации (например, опорные конспекты В.Ф. Шаталова); с ориентацией на решение проблем (методов проектов, сквозного курсового и дипломного проектирования и др.); технологии "гувернёрского" обучения; технологии "тотальной" индивидуализации обучения (метод Келлера—Ширмана); целевые и ролевые игровые технологии, а также технологии, использующие психологическое воздействие на обучаемых (психотроника, медитация, японская технология "Минараи" и т.п.).

Применение вузовскими педагогами ИТО сопряжено с процессом дифференциации содержания обучения — используются различные сочетания перечисленных выше типов дифференциации: профильно-аддитивная; ядерно-аддитивная; ядерно-профильная; трёхмерно-уровневая ядерно-профильно-аддитивная дифференциация.

Усовершенствование модели организации непрерывного обучения "школа — вуз — аспирантура — переподготовка и повышение квалификации — предприятие" заключается в гармоничном сочетании самостоятельной работы слушателя с различными источниками информации, оперативное взаимодействие с преподавателями-тьюторами, групповое обучение с использованием многообразных технологий дистанционного обучения, а также оперативного контроля. Концепция позволяет встроить "русский метод" в каждый этап обучения, включая дистанционную подготовку, а также в процесс абилитации.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинском университете науки и технологии ведётся подготовка специалистов на основе традиций сложившейся и постоянно развивающейся в их стенах классической инженерной школы политехнического образования. Её основополагающими принципами являются интеграция обра-

зования, науки и инновационной деятельности, эффективное взаимодействие и кооперация с промышленными предприятиями и научными организациями.

Для эффективного повышения квалификации и подготовки специалистов большое внимание уделяется:

повышению влияния промышленности на образовательный процесс за счёт участия в формировании и коррекции запроса на подготовку по конкретным специальностям и квалификациям; разработке новых образовательных стандартов нового поколения и образовательных программ с привлечением работодателей; развитию системы отраслевых факультетов на территории базовых предприятий; формированию системы общественно-профессиональной аккредитации вузов;

усилению материально-технической базы образовательных структур университетов, обеспечению производственных практик, соотнесению тем курсовых и дипломных проектов с реальными задачами промышленности;

осуществлению глубокого и всестороннего научно-исследовательского сотрудничества между университетами и предприятиями;

обеспечению взаимной научной и обучающей интеграции между университетами и предприятиями;

содействию в обеспечении повышения квалификации, переподготовки, стажировки и получения второго высшего образования для сотрудников предприятий.

Концепция предусматривает реструктуризацию учебного процесса на основе гибридных и виртуальных технологий; интеграцию учебного, научного и прикладного процесса в университетском техническом образовании, реализующую "русский метод" обучения; непрерывность образовательного процесса, обеспечиваемого использованием многоуровневых систем университетского технического образования; использование высоких информационных технологий, в частности, мультимедийных средств, которые положены в основу очно-заочных и дистанционных форм обучения.

Выводы. Разработаны и реализованы инновационные информационные компоненты концепции: модель виртуального университета, методики и модели непрерывной целевой подготовки, методики дистанционных форм обучения, адаптированные беспроводные технологии. Симбиоз современных информационных технологий и "русского метода" в обучении позволяет получить синергетический эффект, что является инновационным преимуществом по сравнению с другими образовательными концепциями за счёт ускорения и более качественного усвоения материала.

Комплексная концепция обучения позволяет реализовать функцию абилитации, которая обеспечивает, наряду с обучением и образованием, комплексную подготовку человека к профессиональной деятельности, а также его профессиональную самореализацию.

Задача абилитации обучающегося решена за счёт прогнозирования индивидуальной профессиональной траектории, использования в образовательных программах функциональных элементов адаптации к будущей профессиональной деятельности и применением "русского метода" на всех этапах непрерывного обучения.

В результате проведения работы в настоящее время разработаны и полностью адаптированы к учебному процессу новые концептуальные методы в подготовке и переподготовке специалистов по целому ряду высокотехнологических направлений.

При реализации концепции широко использованы элементы модели виртуального университета, методики и модели непрерывной целевой подготовки, методики дистанционных форм обучения, адаптированные беспроводные технологии. Симбиоз современных информационных и дистанционных технологий, "русского метода" в обучении позволяет получить синергетический эффект, что является инновационным преимуществом по сравнению с другими образовательными концепциями за счёт ускорения и более качественного усвоения материала.

Таким образом, в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинском университете науки и технологии разработаны и реализованы концепция подготовки кадров для предприятий национальных индустриальных комплексов, методы обучения с использованием современных информационных технологий, позволяющих интенсифицировать процесс получения и усвоения знаний. Применение в процессе обучения "русского метода" позволяет закрепить теоретические знания, сформировать навыки и умения в каждой фазе непрерывного образовательного процесса. На рисунке (*а—д*, см. обложку) представлены лабораторные стенды и процесс реализации "русского метода" обучения студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана и Нанкинского университета науки и технологии.

Библиографические ссылки

1. **Aleksandrov A.A., Ke Fang, Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Conception of complex continuous education with innovative information technologies // Advances in Education Research. Selected Papers from 2012 2nd. International Conference on Education and Education Management (EEM 2012) Hong Kong September 4—5, 2012. P. 374—378.

2. **Александров А.А., Волошин Д.А., Нагаева И.А., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Исследование и разработка концепций и методов непрерывного обучения. М.: ИИУ МГОУ, 2014. 138 с.

3. **Александров А.А., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Концепция взаимодействия МГТУ им. Н.Э. Баумана с предприятиями ракетно-космической отрасли в вопросах подготовки инженеров и научных кадров // Научный журнал "European Social Science Journal". Международный исследовательский институт. 2013. С. 121—126.

4. **Цибизова Т.Ю.** К вопросу о преемственности научно-исследовательской деятельности обучающихся в системе непрерывного профессионального образования // Образование и общество. 2010, № 6. С. 14—17.

5. **Wong Xiaofeng, He Yong.** Research of methods and forms of implementation of educational process. Труды междунар. научн.-практич. конф. "Актуальные вопросы фундаментальных наук". Дедовск, МО филиал РГСУ 5—7 ноября 2014 [под ред. Л.И. Рогачевой, К.А. Неусыпина] ИИУ МГОУ, 2014. С. 85—89.

6. **Бородулин И.Н., Неусыпин К.А.** Вопросы синтеза систем управления качеством образовательных организаций // Качество, инновации, образование. 2004. № 3. С. 5—9.

7. **Пролетарский А.В., Баскаков И.В.** Профессиональная переподготовка специалистов в области компьютерных сетевых технологий: вопросы, ответы // Материалы междунар. конф. "Проблемы профессиональной переподготовки и повышения квалификации кадров по новым направлениям развития техники и технологий государств-участников СНГ", 12—13 ноября 2008 г. М.: Россельхозакадемия. С. 240—241.

8. **Александров А.А., Абрамешин А.Е., Мешков Н.А., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Разработка и исследование системы управления инновационным развитием Российского образовательного комплекса в условиях информационного общества // Качество, инновации, образование. 2012. № 10. С. 2—14.

9. **Aleksandrov A.A., Neusipin K.A., Proletarsky A.V., Ke Fang.** Innovation development trends of modern management systems of educational organizations // Proceeding of 2012 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. October 20—21, Sanya, China. ICIII 2012. P. 235—238.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

Цена 3000 р.

ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ
отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием
Справочник (в 2х томах)

Под общей редакцией **А.Г. Суслова**

2014 г. Объем 928 с. ISBN 978-5-94275-709-0

Том 1. Приведены общие положения отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием и статические методы ОУО ППД: накатывание, вибронакатывание, алмазное выглаживание, дорнование и калибрование.

Последняя глава посвящена ОУО ППД деталей с закономерным изменением качества поверхностного слоя.

Том 2. Приведены динамические и комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Одна из глав посвящена формообразованию резьб пластическим деформированием, отделочно-упрочняющей и комбинированной обработке резьбовых поверхностей и технологии гладкорезьбовых соединений.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, преподавателей, студентов и аспирантов технических вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

По факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98 или на сайте WWW.MASHIN.RU