

ISSN 1998-6629

ВЕСТНИК

САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского
университета)

№ 4 (46)

2014

УДК 05
ББК Я5

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета)

VESTNIK
of the
SAMARA STATE AEROSPACE UNIVERSITY

№ 4 (46)
2014

Главный редактор

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор, СГАУ

Editor in Chief

Shakhmatov Ye. V., Doctor of Science (Engineering), Professor, SSAU

Заместители главного редактора

Балакин В. Л., д.т.н., профессор, СГАУ

Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор, СГАУ

Deputies Chief Editor

Balakin V. L., Doctor of Science (Engineering), Professor, SSAU

Prokofiev A. B., Doctor of Science (Engineering), Professor, SSAU

Ответственный секретарь

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент, СГАУ

Executive Editor

Prokhorov A. G., Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, SSAU

Реакционная коллегия

Аншаков Г. П., член-корр. РАН

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор, СамГТУ

Барвинок В. А., член-корр. РАН

Богатырев В. Д., д.э.н., профессор, СГАУ

Гречников Ф. В., член-корр. РАН

Казанский Н. Л., д.т.н., профессор, СГАУ

Кирилин А. Н., д.т.н., профессор,

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Комаров В. А., д.т.н., профессор, СГАУ

Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор, СГАУ

Лукачёв С. В., д.т.н., профессор, СГАУ

Сойфер В. А., член-корр. РАН

Шорин В. П., академик РАН

Editorial Board

Anshakov G. P., Corresponding Member of the
Russian Academy of Science

Astafiev V. I., Doctor of Science (Physics and
Mathematics), Professor, SSTU

Barvinok V. A., Corresponding Member of the
Russian Academy of Science

Bogatyrkov V. D., Doctor of Science (Economics),
Professor, SSAU

Grechnikov F. V., Corresponding Member of the
Russian Academy of Science

Kazansky N. L., Doctor of Science (Engineering),
Professor, SSAU

Kirilin A. N., Doctor of Science (Engineering),
Professor, CSDB

Komarov V. A., Doctor of Science (Engineering),
Professor, SSAU

Kuzmichyov V. S., Doctor of Science (Engineering),
Professor, SSAU

Lukachyov S. V., Doctor of Science (Engineering),
Professor, SSAU

Soifer V. A., Corresponding Member of the Russian
Academy of Science

Shorin V. P., Academician of the Russian Academy of
Science

Журнал входит в утвержденный ВАК при Минобрнауки России Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в общероссийский каталог ОАО «Роспечать». Подписной индекс – 18264

© Самарский государственный
аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

© Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye Shosse, Samara
443086, Russian Federation

☎ +7 (846) 267 48 41; e-mail: vest@ssau.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЁТНЫХ НАВЫКОВ
В ПРОЦЕССЕ ТРЕНАЖЁРНОЙ ПОДГОТОВКИ**
А. И. Годунов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков, С. Ж. Куртаев 7
- МЕТОД КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ
ДОКУМЕНТАЦИИ**
В. Д. Еленев, Ю. П. Шупляк 16
- ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА – СБОРЩИКА МУСОРА С ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫМ
ДВИГАТЕЛЕМ МАЛОЙ ТЯГИ**
С. А. Иииков, Г. А. Филиппов 30
- ОЦЕНКА УРОВНЯ НАВЫКОВ КУРСАНТОВ ЛЁТНЫХ
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**
Б. Ж. Куатов, С. Ж. Куртаев 39
- ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА
В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЁТА КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА**
И. В. Фоминов 45
- МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА**

- К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОДАТЛИВОСТИ «БЕЛИЧЬЕГО КОЛЕСА»
В ОПОРАХ РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**
С. А. Десярев, М. К. Леонтьев, В. В. Попов 52
- РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ВОДОВОЗДУШНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК
С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА**
С. С. Достовалова, Р. А. Серебряков, С. Г. Батухтин, А. Г. Батухтин 61
- ЗАДАЧА КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**
Н. А. Зотин 67
- О ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ СОСТОЯНИИ
И ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК
ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГТЭ-45-3**
Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царёва 74

**СТРУКТУРНАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИИ
МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА**

Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Е. А. Мотова, Н. Е. Никитина 82

**ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ
НА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ ПОДСЛОЕ, ПОЛУЧЕННОЕ МЕТОДОМ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ,
ДЛЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царёва, О. Б. Бердник,
Я. А. Фель, Д. Г. Федорченко* 90

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ
УСТАНОВКИ АЛ-31Ф В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Г. С. Филиппов 99

**УСТРАНЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ
ВИБРОНАГРУЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ**

К. Ю. Шабанов, А. Н. Крючков, М. А. Ермилов, М. В. Баляба 107

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

**ПЕРЕСТРОЙКА ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ШАГЕ ДИСКРЕТНОСТИ**

В. Д. Белоногов 119

**АДАПТИВНОЕ БИОУПРАВЛЕНИЕ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЙ
У БОЛЬНЫХ ТРАВМАТИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СПИННОГО МОЗГА
ПРИ ОСЛОЖНЁННОМ ПЕРЕЛОМЕ ПОЗВОНОЧНИКА**

Л. П. Богданова 129

**СТИМУЛЯЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ
МЕХАНИЗМА ЛЕЧЕБНОГО ДЕЙСТВИЯ АДАПТИВНОГО БИОУПРАВЛЕНИЯ
У БОЛЬНЫХ ТРАВМАТИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СПИННОГО МОЗГА**

Л. П. Богданова 138

ЭКОНОМИКА И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

**КРЕДИТНО-БАНКОВСКАЯ СИСТЕМА В 1920-е ГОДЫ
В САМАРСКОМ РЕГИОНЕ**

Н. Ф. Банникова, М. О. Самуилова 144

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

- CONCEPTUAL MODEL OF THE FORMATION OF FLYING SKILLS
IN THE PROCESS OF TRAINING USING FLIGHT SIMULATORS**
A. I. Godunov, B. Z. Kumatov, N. K. Yurkov, S. Z. Kurtaev 7
- ACCURACY CONTROL METHOD FOR SPACE COMPLEX PRODUCTS
AT THE STAGE OF DESIGN ENGINEERING**
V. D. Yelenev, Yu. P. Shuplyak 16
- CHOICE OF DESIGN CHARACTERISTICS OF «GARBAGE COLLECTOR»
SPACECRAFT WITH A LOW-THRUST ELECTROJET ENGINE**
S. A. Ishkov, G. A. Filippov 30
- ASSESSING SKILLS LEVEL OF FLYING CADETS**
B. Z. Kumatov, S. Z. Kurtaev 39
- IDENTIFICATION OF SCALE FACTOR OF A PENDULUM COMPENSATING
ACCELEROMETER DURING AN ORBITAL SPACECRAFT MISSION**
I. V. Fominov 45

MECHANICAL AND POWER ENGINEERING SCIENCES

- “SQUIRREL CAGE” FLEXIBILITY
IN SUPPORTS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINE ROTORS**
S. A. Degtiarev, M. K. Leontiev, V. V. Popov 52
- REGENERATIVE AIR-WATER HEAT EXCHANGER WITH
IMPROVED HEAT EXCHANGE ABILITY**
S. S. Dostovalova, R. A. Serebryakov, S. G. Batukhtin, A. G. Batukhtin 61
- CHECK AND PREDICTION OF GAS-TURBINE ENGINE’S
TECHNICAL STATE**
N. A. Zotin 67
- POST-OPERATION STATE AND EXTENSION OF SERVICE LIFE
OF COMPRESSOR BLADES OF THE GAS-TURBINE POWER
PLANT GTE-45-3**
Y. P. Tarasenko, O. B. Berdnik, I. N. Tsareva 74

**STRUCTURAL AND ACOUSTIC ANISOTROPY OF
TURBOCOMPRESSOR BLADE MATERIAL**

Y. P. Tarasenko, L. A. Krivina, E. A. Motova, N. Ye. Nikitina 82

**HEAT-SHIELDING ZIRCONIUM DIOXIDE COATING ON AN
INTERMETALLIC SUBSTRATE OBTAINED BY THE METHOD
OF HIGH-ENERGY PLASMA SPRAYING FOR GAS-TURBINE
ENGINE TURBINE BLADES**

*Y. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdnik, Ya. A. Fell,
D. G. Fedorchenko* 90

**MATHEMATIC SIMULATION OF AL-31F POWERPLANT RADIATION
IN THE IR RANGE**

G. S. Filippov 99

**ELIMINATION OF GAS DYNAMIC RESONANCE MODES OF VIBRATION
LOADS OF GAS DISTRIBUTION STATION PIPELINE FITTING**

K. U. Shabanov, A. N. Kryuchkov, M. A. Ermilov, M. V. Balyaba 107

CONTROL, COMPUTATIONAL EQUIPMENT AND INFORMATION SCIENCE

**REARRANGEMENT OF DIGITAL CONTROL ALGORITHMS
WITH VARIABLE DISCRETE PITCH SIZE**

V. D. Belonogov 119

**ADAPTIVE BIOFEEDBACK IN THE RESTORATION OF MOVEMENTS
IN PATIENTS WITH TRAUMATIC DISEASE OF THE SPINAL CORD**

L. P. Bogdanova 129

**STIMULATION ELECTROMYOGRAPHY IN DETERMINING
THE MECHANISM OF THERAPEUTIC ACTION OF ADAPTIVE
FEEDBACK FOR PATIENTS WITH TRAUMATIC DISEASE
OF THE SPINAL CORD**

L. P. Bogdanova 138

ECONOMICS AND HUMANITIES

THE CREDIT BANKING SYSTEM OF SAMARA REGION IN THE 1920s

N. F. Bannikova, M. O. Samuilova 144

УДК 629.7.072.8

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЁТНЫХ НАВЫКОВ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНАЖЁРНОЙ ПОДГОТОВКИ

© 2014 А. И. Годунов¹, Б. Ж. Куатов², Н. К. Юрков¹, С. Ж. Куртаев³¹Пензенский государственный университет²Военный институт Сил воздушной обороны им. Т.Я. Бегельдинова,
г. Актобе, Казахстан³Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В разрезе предложенной парадигмы тренажёрной подготовки представлены механизмы формирования перцептивных образов, которые позволяют определить механизм формирования лётных навыков в ходе тренажёрной подготовки лётного состава. Показано, что отличительной особенностью базовой и начальной подготовки является то, что помимо совершенствования стандартных знаний происходит формирование и совершенствование перцептивных интеллектуальных образов, которые в совокупности со знаниями образуют навыки. Процесс формирования навыков заключается в тренировках оператора по выполнению целенаправленных мыслительных действий с апперцептивными и перцептивными сенсорными и моторными образами, а процесс формирования знаний – в занятиях по становлению и накоплению самих этих образов. Формирования навыков для различных типовых ситуации подобны друг другу, однако для каждой ситуации характерны свои схемы мыслительных процессов, определяемые сочетанием и последовательностью смены образов. У каждого будущего лётчика элементы сенсорной, моторной и интеллектуальной систем имеют свои специфические настройки, поэтому в ходе тренировок элементы этих систем подстраиваются друг под друга в соответствии с конкретным видом лётной деятельности. Такая подстройка может осуществляться также по типовым ситуациям, которые отличаются приоритетами в использовании элементов систем оператора. Сформулированы возможные конфликтные ситуации формирования и реализации навыков. Дана концептуальная модель множества навыков по применению летательного аппарата и его систем в типовой ситуации.

Концептуальная модель, лётная подготовка, тренажёр, знания, навыки, сенсорная система, механизм формирования навыков.

Введение

Целью тренажёрной подготовки (ТП) лётного состава (ЛС) является обучение применению летательного аппарата (ЛА) и его систем на множестве возможных типовых ситуаций (упражнений) $\Omega = \{\Omega_p\}$. Каждая типовая ситуация характеризуется содержательным компонентом, определяющим конкретные условия функционирования $\Delta_p \in \Delta = \{\Delta_l\}$ и предписанные операции применения $D_p \in D = \{D_k\}$ ЛА. При этом задачей обучения является формирование по типовым ситуациям (упражнениям) $\Omega = \{\Omega_p\}$ у лётного состава перцептивных образов

$\Psi = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\} = \{\Psi_p\}$: сенсорных (воспринимаемых) $\Psi_{\Xi} = \{\Psi_{\Xi_p}\}$; моторных (исполняемых) $\Psi_D = \{\Psi_{D_p}\}$, а также интеллектуальных (синтезируемых) образов $\Psi_U = \{\Psi_{U_p}\}$.

Парадигма тренажёрной подготовки

Перцепция – смутное и бессознательное восприятие в противоположность ясному осознанию – апперцепции. Причём эти образы на множестве ситуаций Ω находятся между собой во взаимосвязи

$$\Psi_{\Xi} \Leftrightarrow \Psi_U \Leftrightarrow \Psi_D, \quad (1)$$

которая показывает, что Ψ_{Ξ} соответствует Ψ_D , а Ψ_D соответствует Ψ_{Ξ} через образы Ψ_U .

На основании изложенной цели и в соответствии с постановкой задачи тренажёрной подготовки имеем [1]:

$$\Omega := (\Delta, D) \Leftrightarrow \Psi, \text{ а } \Psi_{\Xi} \Leftrightarrow \Psi_U \Leftrightarrow \Psi_D, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Omega_p &:= (\Delta_p, D_p) \Leftrightarrow \Psi_p, \\ \Psi_{\Xi_p} &\Leftrightarrow \Psi_{U_p} \Leftrightarrow \Psi_{D_p}. \end{aligned} \quad (3)$$

Перцептивные образы $\Psi = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\}$ хранятся в долговременной памяти интеллектуальной системы и являются «отпечатками» информационно-управляющих полей $\Xi = \{\Xi_p\}$ и операций $D = \{D_p\}$ по типовым ситуациям $\Omega = \{\Omega_{\delta}\}$.

Тренажная подготовка может происходить в интересах:

- приобретения неизвестных оператору стандартных перцептивных $\Psi_i = \{\Psi_{i\Xi}, \Psi_{iD}, \Psi_{iU}\}$ образов по новым для него типовым ситуациям $\Omega_i = \{\Omega_{i_r}\}$;

- восстановления приобретённых оператором стандартных знаний перцептивных $\Psi_{\hat{a}} = \{\Psi_{\hat{a}\Xi}, \Psi_{\hat{a}D}, \Psi_{\hat{a}U}\}$ образов по ранее известным, но забытым им типовым ситуациям $\Omega_{\hat{a}} = \{\Omega_{\hat{a}_g}\}$;

- замещения (стирание и приобретение) приобретённых оператором стандартных образов на новые перцептивные $\Psi_{\hat{c}} = \{\Psi_{\hat{c}\Xi}, \Psi_{\hat{c}D}, \Psi_{\hat{c}U}\}$ образы по скорректированным типовым ситуациям $\Omega_{\hat{c}} = \{\Omega_{\hat{c}_h}\}$.

Тренажную подготовку ЛС можно условно разбить на три этапа [2]:

- начальная подготовка – формирование стандартных знаний $\Psi_{kn} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D\} \in \Psi$ по типовым ситуациям $\Omega = \{\Omega_{\delta}\}$;

- базовая подготовка – формирование стандартных навыков $\Psi_{sk} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\} = \{\Psi_p\}$, соответствующих знаниям $\Psi_{kn} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D\}$ по типовым ситуациям $\Omega = \{\Omega_{\delta}\}$;

- профессиональная подготовка – формирование умения синтеза нестандартных знаний $\tilde{\Psi}_{kn} = \{\tilde{\Psi}_{\Xi}, \tilde{\Psi}_D\}$ по изменённым типовым ситуациям или (и) по нестандартным ситуациям $\tilde{\Omega} = \{\tilde{\Omega}_{\delta}\}$ на базе стандартных знаний $\Psi_{kn} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D\}$ и навыков $\Psi_{sk} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\} = \{\Psi_p\}$.

Отличительной особенностью базовой подготовки от начальной является то, что помимо совершенствования стандартных знаний $\Psi_{kn} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D\}$ происходит формирование и совершенствование перцептивных интеллектуальных Ψ_U образов, которые в совокупности со знаниями образуют навыки $\Psi_{sk} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\}$. Необходимо отметить, что замещение знаний, а тем более навыков, требует от ЛС больше умственных, физических и временных затрат, чем приобретение им новых или восстановление старых знаний и навыков.

Проанализируем связь перцептивных образов $\Psi_{sk} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\}$ с классическим понятием навыка: навык – умение выполнять целенаправленные действия, доведённые до автоматизма в результате сознательных многократных повторений одних и тех же движений или решения типовых задач в производственной или учебной деятельности. Для этого сначала рассмотрим процесс формирования самих перцептивных образов $\Psi_{sk} = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\}$.

Механизм формирования перцептивных образов

Оператор с помощью сенсорной системы O_{Ξ} воспринимает текущее состояние информационно-управляемого поля Ξ_p тренажного средства.

Сенсорные образы $\Psi_{\Xi} = \{\Psi_{\Xi_p}\}$ у оператора образуются посредством сенсорной системы O_{Ξ} , включающей в себя следующие основные элементы [3]:

- подсистему зрения O_{si} , которая предназначена для восприятия информационных параметров визуального (оптического) диапазона (визуальное отражение состояния и текущих действий над органами управления, визуальная индикация взаимодействия ЛА и его систем со средой и функционирования самого ЛА, оптические помехи и т.п.);

- подсистему слуха O_{he} , которая предназначена для восприятия информационных параметров звукового диапазона (речевые сообщения, звуковые шумы и т.п.);

- подсистему осязания O_{io} , которая предназначена для восприятия информационных параметров вне оптического и звукового диапазона (температуры, вибрации и т.п.);

- подсистему обоняния O_{se} , которая предназначена для восприятия окружающих запахов (различных аэрозолей, гари элементной базы и т.п.).

В зависимости от вида лётной деятельности одна часть этих подсистем может выступать как основная (доминирующая), а другая – как дополнительная (способствующая).

Информационное поле Ξ_p , поступающее на вход сенсорной системы O_{Ξ} , из-за наличия нехарактерных для типовой ситуации Ω_p помех $\delta \Xi_p$ может отличаться от действительного. Помехи $\delta \Xi_p$ могут быть объективными (непреднамеренными) и субъективными (организованными); имитационными и шумовыми; механическими, звуковыми, оптическими, температурными, аэрозольными и т.п. Из-за наличия внутренних (операторских) ошибок восприятия δO_{Ξ} информационное поле Ξ_p сенсорной системой O_{Ξ} воспринимается в искажённом виде Ξ'_p . Сенсор-

ные ошибки δO_{Ξ} могут быть врождёнными или приобретёнными: дефекты органов зрения и слуха, органов осязания и обоняния из-за хронических и эпизодических заболеваний (простудных, травматических, психологических, профессиональных и т.п.).

Воспринимаемое сенсорной системой O_{Ξ} информационное поле Ξ'_p поступает в интеллектуальную систему O_U , где оно с помощью мыслительных процессов преобразуется в апперцептивные сенсорные образы Ψ_{Ξ_p} , которые запоминаются в долговременной памяти в виде перцептивных сенсорных образов $\Psi_{\Xi} = \{\Psi_{\Xi_p}\}$.

Моторные образы $\Psi_D = \{\Psi_{D_p}\}$ опосредованно формируются в интеллектуальной системе O_U оператора с помощью целенаправленных мыслительных процессов при реализации моторной системой O_D предписываемых операций $D = \{D_p\}$ по типовым ситуациям $\Omega = \{\Omega_p\}$, отражаемым непосредственно апперцептивными сенсорными $\Psi_{\Xi} = \{\Psi_{\Xi_p}\}$ образами.

Моторная система O_U оператора включает в себя [4]:

- двигательную подсистему O_{im} , которая предназначена для осуществления действий над органами управления ЛА и его систем;

- речевую подсистему O_{sp} , которая предназначена для выполнения речевых сообщений.

Так же, как и для сенсорной системы, в зависимости от вида лётной деятельности один из элементов моторной системы может выступать в качестве основного (ведущего), а другой – дополнительного (ведомого). Возможны такие ситуации для некоторых видов лётной деятельности, когда элементы моторной системы не имеют приоритетов, т.е. по своему функциональному предназначению они между собой эквивалентны.

Действия над органами управления и речевые сообщения выступают в своём

роде как реакция оператора на функционирование ЛА и на его взаимодействие со средой.

Интеллектуальная система O_U оператора включает в себя:

- мыслительные процессы (процессор) O_{pr} , которые предназначены для осуществления умственных операций с апперцептивными и перцептивными образами в интересах реализации операций;

- оперативную память O_{opt} , которая предназначена для временного хранения результатов обработки апперцептивных и перцептивных образов;

- долговременную память O_{lom} , которая предназначена для продолжительного хранения приобретённых перцептивных образов.

Так как изначально у каждого человека (будущего оператора) элементы сенсорной, моторной и интеллектуальной систем имеют свои специфические настройки, то в ходе тренировок элементы этих систем подстраиваются друг под друга в соответствии с конкретным видом лётной деятельности. Такая подстройка может осуществляться также по типовым ситуациям, которые отличаются приоритетами в использовании элементов систем оператора.

Механизм формирования навыков

Одновременно при формировании апперцептивных моторных образов $\psi_D = \{\psi_{D_p}\}$ у оператора образуются апперцептивные интеллектуальные образы $\psi_U = \{\psi_{U_p}\}$, которые для каждой ситуации Ω_p определяют сочетание и последовательность (алгоритм) мыслительных операций над апперцептивными ψ_{Ξ_p} , ψ_{D_p} и перцептивными Ψ_{Ξ_p} , Ψ_{D_p} образами. Сформированные апперцептивные моторные $\psi_D = \{\psi_{D_p}\}$ и интеллектуальные $\psi_U = \{\psi_{U_p}\}$ образы поступают в долговременную память, где хранятся в виде

перцептивных моторных $\Psi_D = \{\Psi_{D_p}\}$ и интеллектуальных $\Psi_U = \{\Psi_{U_p}\}$ образов [5].

Таким образом, навыки оператора - умение оператора выполнять целенаправленные мыслительные действия $\Psi_U = \{\Psi_{U_p}\}$ с апперцептивными $\psi_{\Xi} = \{\psi_{\Xi_p}\}$, $\psi_D = \{\psi_{D_p}\}$ и перцептивными $\Psi_{\Xi} = \{\Psi_{\Xi_p}\}$, $\Psi_D = \{\Psi_{D_p}\}$ образами в интересах реализации операций $D = \{D_p\}$ применения ЛА и его систем, доведённые до автоматизма в результате сознательно-многократного выполнения одних и тех же типовых упражнений операторской деятельности.

Процесс формирования навыков заключается в тренировках оператора по выполнению целенаправленных мыслительных действий с апперцептивными и перцептивными сенсорными и моторными образами, а процесс формирования знаний – в занятиях по становлению и накоплению самих этих образов. Формирование навыков для различных типовых ситуаций подобно друг другу, однако для каждой ситуации характерны свои схемы мыслительных процессов, определяемые сочетанием и последовательностью смены образов. В принципе для каждой типовой ситуации Ω_p перцептивные сенсорные Ψ_{Ξ_p} и моторные Ψ_{D_p} образы представляют собой некий «банк образов» $\{\Psi_{\Xi_{pt}}\}$ и $\{\Psi_{D_{pt}}\}$. Из «банка образов» в соответствии с текущими t условиями функционирования и этапами выполнения операции применения ЛА и его систем «изымаются» в определённой последовательности отдельные образы $\Psi_{\Xi_{pt}}$ и $\Psi_{D_{pt}}$.

Известно, что выполнение операции применения ЛА – это совокупность действий, упорядоченных в пространстве и во времени. Этот порядок соответствует определённой логической схеме (программе) целенаправленных мыслительных действий. Поэтому помимо перцептивных

зрения нереально и поэтому сформированные образы $\Psi = \{\Psi_{\Xi}, \Psi_D, \Psi_U\}$ всегда будут отличаться от идеальных образов $\hat{\Psi} = \{\hat{\Psi}_{\Xi}, \hat{\Psi}_D, \hat{\Psi}_U\}$.

Таким образом, начальная и базовая ТП оператора должна способствовать:

- формированию в долговременной памяти оператора ранее ему неизвестных перцептивных образов $\Psi_i = \{\Psi_{i\Xi}, \Psi_{iD}, \Psi_{iU}\}$ (согласно новой цели обучения $\Omega_i = \{\Omega_{ir}\}$), а также восстановлению $\Psi_a = \{\Psi_{a\Xi}, \Psi_{aD}, \Psi_{aU}\}$ или замещению $\Psi_{\zeta} = \{\Psi_{\zeta\Xi}, \Psi_{\zeta D}, \Psi_{\zeta U}\}$ ранее приобретённых им образов (согласно принятой $\Omega_{\hat{e}} = \{\Omega_{\hat{e}g}\}$ или скорректированной $\Omega_{\hat{e}} = \{\Omega_{\hat{e}h}\}$ цели обучения);

- умелому анализу оператором информационно-управляющего поля $\Xi_p \in \Xi$ ЛА (отражающего конкретную типовую ситуацию $\Omega_p \in \{\Omega_r, \Omega_u, \Omega_k\}$), направленному на выработку у него внимания, пра-

вильности обнаружения и распознавания по Ξ_p сенсорного $\Psi_{\Xi p}$ образа из множества Ψ_{Ξ} образов, хранящихся у него в долговременной памяти;

- рациональному выбору оператором способа применения ЛА и его систем Ψ_{Dp} из множества перцептивных моторных Ψ_D образов, хранящихся в его памяти, с учётом их возможностей и перцептивного сенсорного $\Psi_{\Xi p}$ образа;

- корректной реализации оператором с помощью его моторной системы и органов управления ЛА операции D_p'' , соответствующей моторному Ψ_{Dp} образу и умению её корректировать при изменении $\Psi_{\Xi p}$.

Концептуальная модель множества навыков по применению ЛА и его систем в типовой ситуации Ω_{sn} можно представить в виде следующего кортежа:

$$Sk = \{Sk_p\} = \langle \Xi / (D, \Delta), \Psi_{\Xi} / \Xi, \Psi_U / \Psi_{\Xi}, \Psi_D / \Psi_U, D'' / \Psi_D \rangle, \quad (5)$$

где $\Xi / (D, \Delta) = \{\Xi_p / (D_p, \Delta_p)\}$ – множество вариантов информационно-управляющего поля, отражающее стандартные операции D и типовые условия Δ применения ЛА и его систем; $\Psi_{\Xi} / \Xi = \{\Psi_{\Xi p} / \Xi_p\}$ – множество сенсорных перцептивных образов, соответствующее Ξ ; $\Psi_U / \Psi_{\Xi} = \{\Psi_{Up} / \Psi_{\Xi p}\}$ – множество интеллектуальных перцептивных образов, соответствующее Ψ_{Ξ} ; $\Psi_D / \Psi_U = \{\Psi_{Dp} / \Psi_{Up}\}$ – множество моторных перцептивных образов, соответствующее Ψ_U ; $D'' / \Psi_D = \{D_p'' / \Psi_{Dp}\}$ – множество операций применения ЛА и его систем, реализуемое в соответствии с моторными Ψ_D образами.

Необходимо отметить, что в процессе профессиональной деятельности оператор:

- вырабатывает умение синтеза нестандартных знаний по изменённым типовым ситуациям или (и) по нестандартным ситуациям на базе стандартных знаний и навыков;

- приобретает мастерство по синтезу нестандартных навыков по изменённым типовым ситуациям или (и) по нестандартным ситуациям на базе стандартных и нестандартных знаний и типовых навыков.

Как правило, профессиональная деятельность выходит за рамки курсов ТП и производится в процессе непосредственной эксплуатации ЛА лётным составом. При этом справедливыми являются следующие утверждения, отражающие конфликтные ситуации:

- если синтез нестандартных знаний производится на базе стандартных, но искажённых (ложных) знаний, то сами не-

стандартные знания окажутся искажёнными (ложными);

- если синтез нестандартных навыков производится на базе стандартных и нестандартных искажённых (ложных) знаний и типовых искажённых (ложных) навыков, то сами нестандартные навыки окажутся искажёнными (ложными).

Известно, что конкретной типовой ситуации (упражнению) соответствуют стандартная операция D_p применения ЛА и заданные условия их функционирования, которые в предельном случае должны формироваться у лётного состава в виде потенциально возможных образов, характеризующихся конкретными отличительными признаками. При приобретении (восстановлении) или старении образов у них могут качественно и количественно изменяться отличительные признаки. От качества отличительных признаков зависит восприятие (обнаружение) исходного образа, от количества отличительных признаков – его распознавание. Качество и количество отличительных признаков образа определяют возможности его идентификации среди других образов. Возможны такие ситуации, когда сформированные образы для конкретной типовой ситуации Ω_p могут по «отличительным» признакам оказаться сходными с образами, которые изначально формировались по совершенно другим ситуациям Ω_k , $k \neq p$. Такое сходство отличительных признаков может быть как на качественном, так и на количественном уровне. В зависимости от степени сходства по «отличительным» признакам двух образов они могут быть: эквивалентными – полностью соответствуют друг другу; подобными – частично соответствуют друг другу. Адекватными образами могут считаться только эквива-

лентные образы, для которых существуют эквивалентные типовые ситуации.

Другими словами, существование эквивалентных перцептивных образов свидетельствует о наличии конфликта знаний и навыков по соответствующим типовым ситуациям. Естественно, что вероятность правильного обнаружения и идентификации, а значит и распознавания образов, снижается с увеличением числа эквивалентных образов. В зависимости от индивидуальных способностей (врождённых и приобретённых) операторов у них может быть различная чувствительность к возможности различия двух подобных образов. Известно, что если два образа Ψ_p и Ψ_k отличаются между собой менее чем на 10-15%, то оператор не чувствителен к их различию, т.е. для него эти образы эквивалентны друг другу. С учётом этого, часть на самом деле подобных образов оператор может воспринимать как эквивалентные, а значит по соответствующим типовым ситуациям у него могут быть сформированы конфликтные знания и навыки.

Заключение

Таким образом, современная система ТП лётного состава подвержена конфликтам, которые являются объективными как в организационно-технических, так и в психолого-физиологических аспектах. При этом организационно-техническая и психолого-физиологическая стороны конфликтов ТП взаимосвязаны между собой. Это необходимо учитывать при определении мер по защите от возможных конфликтов. Разрешение конфликта заключается в «правильности» использования технических средств в общей системе тренажёрной подготовки лётного состава.

Библиографический список

1. Дикарев В.А. Автоматизация тренажёрной подготовки операторов радиоэлектронных объектов / Под ред. В.В. Сысоева. М: Радиотехника, 2002. 168 с.

2. Зайцев В.С. Системный анализ операторской деятельности. М: Радио и связь, 1990. 120 с.

3. Юрков Н.К. Синтез концептуальной модели предметной области. Особенности моделирования сложных систем // Измерительная техника, 2004. № 2. С. 11-14.

4. Годунов А.И., Кемалов Б.К., Юрков Н.К. Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 3 (19). С. 15-24.

2011. № 3 (19). С. 15-24.

5. Годунов А.И., Квятковский Ю.Г., Юрков Н.К. Синтез автоматизированной системы оценивания качества пилотирования на авиационном тренажере // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 1(21). С. 58-64.

Информация об авторах

Годунов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», Пензенский государственный университет. E-mail: Godunov@pnzgu.ru. Область научных интересов: разработка и проектирование авиационных тренажеров.

Куатов Бауржан Жолдыбаевич, заместитель начальника по учебной и научной работе, Военный институт Сил воздушной обороны им. Т.Я. Бегельдинова. E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru. Область научных интересов: организация и управление учебным процессом в военном вузе, подготовка авиационных специалистов.

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры», Пензенский государственный университет. E-mail: yurkov_NK@mail.ru. Область научных интересов: разработка и проектирование радиоэлектронной аппаратуры, технология радиоэлектронных средств.

Куртаев Сабит Жанболатович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sabit5@mail.ru. Область научных интересов: техническая эксплуатация и диагностика воздушных судов.

CONCEPTUAL MODEL OF THE FORMATION OF FLYING SKILLS IN THE PROCESS OF TRAINING USING FLIGHT SIMULATORS

© 2014 A. I. Godunov¹, B. Z. Kumatov², N. K. Yurkov¹, S. Z. Kurtaev²

¹Penza State University, Penza, Russian Federation

²Air Defence Forces Institute of the named after T. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

³Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Mechanisms of perceptive image formation are presented in terms of the proposed paradigm. These mechanisms make it possible to determine the mechanism of flying skills formation in the process of flying personnel simulator training. It is shown that basic and primary training is characterized by the fact that, apart from improving the fundamental knowledge, it leads to the formation and development of perceptive intellectual images that form skills when combined with the knowledge. The process of skills formation consists in operator's training in fulfilling purposeful mental actions with apperceptive and perceptive sensory and motor images, while the process of knowledge development implies carrying out training sessions on the accumulation of such images. Skills development is similar for different typical situations, but each situation requires particular mental actions depending on the combination and sequence of image variation. Each prospective pilot has his own specific settings of elements of sensory, motor and intellectual systems, so in the course of training elements of these systems are adjusted to each other in accordance with the particular type of flight activity. Such adjustment

can also be carried out for typical situations that differ in priorities in the use of the operator's elements. Possible conflict situations in the process of skills formation and implementation are described in the article. A conceptual model of a set of skills necessary for the use of aircraft and its systems in typical situations is presented.

Conceptual model, flight training simulator, knowledge, skills, sensory systems, mechanism of skills formation.

References

1. Dikarev V.A. Avtomatizatsiya trenazhernoy podgotovki operatorov radioelektronnikh obektov [Automatization of electronics operators' simulator training] / ed. by V.V. Sisoyev. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2002. 168 p.
2. Zaytsev V.S. Sistemniy analiz operatorskoy deyatelnosti [System analysis of operator's activity]. M: Radio i svyaz' Publ., 1990. 120 p.
3. Yurkov N.K. Synthesis of a Conceptual Model of a Subject Domain. Characteristic Features of Modeling Complex Systems // Measurement technique, 2004. V. 47, no. 2. P. 128-133.
4. Godunov A.I, Kemalov B.K, Yurkov N.K. Providing complex conformity of aviation simulators // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2011. No. 3 (19). P. 15-24. (In Russ.)
5. Godunov A.I., Kvyatskiy Y.G., Yurkov N.K. Synthesis of computer-aided system of evaluating pilot control quality using flight simulators // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2012. No. 1 (21). P. 58-64. (In Russ.)

About the authors

Godunov Anatoly Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automation and Telemechanics, Penza State University, Russian Federation. E-mail: Godunov@pnzgu.ru. Area of Research: development and design of flight simulators.

Kuatov Baurzhan Zholdybaevich, Deputy Head for Academic and Research Activity, Air Defense Force Institute of the named after T. Begeldinov, Aktobe, Republic of Kazakhstan. E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru. Area of Research: organization and management of the educational process at a military higher school, training of aviation specialists.

Yurkov Nikolay Kondratyevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Radioelectronic Equipment Design and Production, Penza state university, Penza, Russian Federation. E-mail: yurkov_NK@mail.ru. Area of Research: radioelectronic equipment design and production.

Kurtaev Sabit Zhanbolatovich, post-graduate student of the Aircraft Maintenance Department, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: sabit5@mail.ru. Area of Research: aircraft maintenance diagnostics.

УДК 629.78

МЕТОД КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

© 2014 В. Д. Еленев¹, Ю. П. Шупляк²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ОАО «РКЦ «Прогресс», г. Самара

Рассматриваются вопросы контроля над заданной точностью изделий космического комплекса на этапе разработки конструкторской документации.

Точность изделия на этапе разработки конструкторской документации рассматривается как системная характеристика, охватывающая совокупность единичных требований по точности изделия, заданных на этапе разработки технического задания.

В основу метода положено понятие о типовом проектном параметре точности, при помощи которого фиксируется всё множество единичных требований по точности изделия, определяемых техническим заданием. Все требования по точности изделия, реализуемые на этапе разработки конструкторской документации, приводятся к заданному в техническом задании исходному множеству типовых проектных параметров точности с целью подтверждения (или не подтверждения) их соответствия друг другу.

Точность, размерный анализ, расчёт размерных цепей, верификация, электронная модель изделия, типовой проектный параметр точности, метрическое пространство.

Введение

Работа относится к проблематике обеспечения точности изделий космического комплекса (КК) на различных этапах их жизненного цикла существования (ЖЦС). Под изделиями КК в данном случае понимаются составные части (СЧ) КК различного уровня иерархии, для создания которых разрабатываются отдельные технические задания (ТЗ).

Точность изделия является одним из важнейших показателей, отражающих его способность выполнять поставленные задачи на этапе эксплуатации в составе КК и определяющих качество изделия на всех этапах ЖЦС. Она задаётся в ТЗ, обеспечивается на этапах разработки конструкторской документации (КД) и изготовления и далее контролируется на всех последующих этапах ЖЦС изделия.

Основным инструментом, при помощи которого производится контроль точности изделия на этапе разработки КД, является размерный анализ (РА), опирающийся на математический аппарат теории размерных цепей (РЦ).

С помощью РА становится возможным решить любые задачи (прямые и обратные), которые могут возникнуть при обеспечении точности изделия на различных этапах ЖЦС [1, 2].

Существуют различные методики проведения РА на точность с использованием компьютерных технологий, в том числе:

- «Parametrik Technology corporation Creo Elements/Pro 5.0 Анализ допуска Основанный Технологией SETOL», используемая на базе системы Creo Elements/Pro Tolerance Analysis Extension;

- модуль «Библиотека расчёта размерных цепей» в КОМПАС-3D и другие (например [3]).

Однако все эти методики распространяются только на этапы разработки КД и изготовления, а контроль над обеспечением реализации заданных в ТЗ требований по точности изделия на последующих этапах ЖЦС в настоящее время проводится вручную.

Данное обстоятельство значительно затрудняет объективный контроль над точностью изделия в виде аудиторской

проверки подтверждения точности изделия третьей независимой стороной и однозначно исключает процессы обеспечения заданных в ТЗ требований по точности изделия на последующих этапах ЖЦС из единого информационного пространства (ЕИП), в рамках которого действуют процессы обеспечения качества изделия.

В настоящей работе рассматривается один из возможных вариантов решения данной проблемы на этапе разработки КД.

Состояние проблемы объективного контроля над обеспечением точности изделия на различных этапах жизненного цикла существования

При рассмотрении проблемы обеспечения объективного контроля над обеспечением точности изделий на этапе разработки КД в качестве исходных, не подлежащих обсуждению и принимаемых в качестве аксиом, принимаются следующие положения.

1. Проблема обеспечения объективного контроля над реализацией заданных в ТЗ требований по точности изделия рассматривается в рамках процессов нисходящего проектирования, предполагающих разделение (с известной степенью условности) процесса проектирования изделия на два взаимосвязанных этапа ЖЦС, выполняемых друг за другом в следующей последовательности: этап разработки ТЗ; этап разработки КД.

2. САПР, используемые при нисходящем проектировании, должны соответствовать требованиям нормативной базы, которая представлена в [4-6].

К числу таких САПР, используемых на предприятии, можно отнести, например:

- среди отечественных систем – САПР «Компас»;
- среди зарубежных систем – САПР Pro/Engineer.

3. Вопросы, связанные с тем, каким образом проводится РА и задаются требования по точности в ТЗ и обеспечиваются

их реализация на этапе разработки КД, не рассматриваются.

В настоящей работе предполагается, что РА, определяющий требования по точности изделия на этапах разработки ТЗ и КД, проведён, а его результаты известны и содержатся в размерных базах, определяющих точность изделия в электронных моделях изделия (ЭМИ) [5], которые могут быть двух видов:

- проектные ЭМИ (ЭМИП), разрабатываемые проектными подразделениями;
- конструкторские ЭМИ (ЭМИК), разрабатываемые конструкторскими подразделениями.

Известно [7], что процессы нисходящего проектирования гарантируют выполнение требований ТЗ, но, вместе с тем, они не гарантируют реализуемость требований данного ТЗ. Поэтому процессы нисходящего проектирования носят итеративный характер, то есть предполагают возможность неоднократного чередования процедур синтеза (структурного и параметрического) и верификации.

Здесь, в соответствии с [8], следует понимать:

- под верификацией – подтверждение (посредством представления объективных свидетельств) того, что установленные требования были выполнены;
- под объективным свидетельством – данные, полученные путём наблюдения, измерения, испытания или другим способом, подтверждающие наличие или истинность чего-либо.

В настоящей работе в качестве объективного свидетельства рассматриваются два результата РА изделия на точность на этапах разработки ТЗ и КД, а верификация КД на соответствие требованиям ТЗ по точности (далее по тексту – верификация) рассматривается как процедура, связанная с контролем соответствия этих результатов РА друг другу.

Мощности множеств размеров, определяющих точность изделия в размерных базах ЭМИП и ЭМИК, имеют различный порядок, при этом оба множе-

ства размеров должны подтверждать одну и ту же точность изделия.

Здесь возникают следующие вопросы:

- что считать точностью изделия на различных этапах ЖЦС;
- что является единицей размерного анализа точности изделия;
- что является мерой точности изделия.

Приведём следующее определение точности.

Определение 1. «Точность геометрического параметра – степень приближения действительного значения геометрического параметра к его номинальному значению» [9].

Известны и другие определения точности, но все они в конечном итоге сводятся к приведённому выше определению, носят частный характер и не привязаны к этапам ЖЦС.

Известны следующие виды (категории) РА: анализ детали; анализ механизма или изделия; анализ технологического процесса. Методология проведения данных категорий РА приведена, например, в [10], однако она справедлива только для этапов разработки КД и изготовления.

Проблема создания эффективных методов верификации КД на соответствие требованиям ТЗ с помощью упоминаемых выше САПР связана с тем, что ЭМИП и ЭМИК представляют собой две 3-мерные САД-модели, основные построения в которых выполняются в рамках электронных спецификаций изделий по номинальным размерам. Информация по размерам, имеющим допуски, вводится в такие модели искусственно:

- либо аналогично традиционным конструкторским чертежам в виде отдельно параметризованных размеров;
- либо в виде текстовых аннотаций.

При этом во время копирования геометрии изделия из ЭМИП в ЭМИК:

- происходит потеря информации по параметризованным размерам;

- отсутствует прямая связь между параметризованными размерами в ЭМИП и ЭМИК.

Примечание 1. Здесь и далее по тексту под параметризованными размерами будут пониматься такие размеры, у которых, помимо номинальных размеров, указаны допуски.

Таким образом, проблема контроля над точностью изделий на этапе разработки КД в настоящее время не имеет формального решения и превращается в сугубо субъективную процедуру, связанную с большой трудоёмкостью и требующую высокой квалификации исполнителей, которые не всегда могут быть объективными. При этом аудиторская проверка подтверждения точности изделия третьей независимой стороной с помощью РА становится очень затруднительной.

Точность изделия. Общие положения и основное определение

Разделение процесса проектирования изделия на этапы разработки ТЗ и КД обусловлено разными целями и задачами, решаемыми на данных этапах.

Основной целью этапа разработки ТЗ является создание проекта изделия, реализующего поставленные задачи на уровне, соответствующем современному уровню науки и техники.

Основной целью этапа разработки КД является создание конструкции изделия, соответствующей всем требованиям ТЗ с учётом возможности изготовления изделия на существующей производственной базе завода-изготовителя.

Основное условие для завершения разработки КД изделия и перехода к этапу изготовления сформулируем следующим образом:

«Для успешного завершения этапов проектирования изделия (с учётом обеспечения заданной точности изделия) и последующего перехода к этапу изготовления изделия:

- необходимо, чтобы разработанная КД соответствовала существующей производственной базе завода-изготовителя;

- достаточно, чтобы разработанная КД соответствовала требованиям ТЗ».

Чтобы провести РА изделия на любом этапе проектирования, необходимо формально описать точность изделия (детали, узла, машины) в виде ограниченного множества размеров (назовём их параметрами точности - ПТ), которые отличаются от прочих размеров, определяющих размерную базу ЭМИП (ЭМИК), следующими особенностями:

- каждый ПТ имеет одинаковую структуру (номинальное значение и допустимые отклонения от номинального значения);

- значение каждого ПТ выражается языком чисел (метрических характеристик), что позволяет количественно сравнивать его с другими размерами точности на различных этапах ЖЦС посредством счёта или измерения.

В то же время ПТ, представляющие точность изделия на этапах разработки ТЗ и КД, отличаются друг от друга тем, что принадлежат разным моделям. Чтобы отличать их друг от друга, введём дополнительную идентификацию: проектные ПТ (ППТ) и конструктивные ПТ (КПТ).

Любое изделие КК имеет иерархическую структуру (детали, сборочные единицы, изделие в целом). Соответственно точность изделия также должна иметь иерархическую структуру. В настоящей работе точность изделия, представленная в ЭМИП и ЭМИК, рассматривается на трёх уровнях иерархии:

- на нижнем уровне – как точность множества электронных моделей проектных модулей (ЭМПМ) для ЭМИП и электронных моделей деталей (ЭМД) для ЭМИК, в которых каждая ЭМПМ (ЭМД) описывается в виде множества помодульных (поддетальных) ПТ;

- на среднем уровне – как точность взаимного расположения всех ЭМПМ (ЭМД) относительно друг друга в составе ЭМИП (ЭМИК), которая рассматривается

в виде электронной модели сборочной единицы (ЭМСЕ) [5];

- на верхнем уровне – как точность изделия в целом, рассматриваемая в виде некоторой интегральной характеристики всех составляющих ППТ (КПТ) нижних уровней иерархии.

Иерархическое построение даёт право считать точность изделия системной характеристикой изделия, которая имеет следующие особенности [11]:

- не поддаётся непосредственному наблюдению;

- является характеристикой системы с иерархической структурой и сама имеет иерархический характер;

- определяется только при помощи формального описания, которое охватывает все уровни иерархии.

На различных этапах ЖЦС точность изделия может изменяться, то есть имеет свойства динамичности. При этом на всех этапах ЖЦС точность изделия обязательно должна соответствовать заданной в ТЗ точности в рамках назначенной меры точности, то есть точность изделия обладает свойствами устойчивости.

Дадим понятию о точности изделия следующее определение.

Определение 2. «Точность изделия есть системная характеристика изделия, имеющая структуру иерархического типа, описываемая на различных этапах иерархии ограниченным множеством идентифицированных параметров точности, имеющих для соответствующего этапа ЖЦС конкретные количественные значения, обладающая на различных этапах ЖЦС свойствами динамичности и устойчивости в рамках заданной меры точности».

Основная идея метода

ЭМИП и ЭМИК представляют собой две модели, построенные в рамках единой (базовой) системы координат (БСК) и размещённые в метрическом (Евклидовом) пространстве.

Известно, что в рамках системы координат любую точку можно однозначно описать в пространстве отдельно и уникально от других, используя начало отсчёта, оси координат и расстояния от начала отсчёта до проекций точки на оси. При необходимости, зная взаимное расположение друг относительно друга двух точек, принадлежащих ЭМИП, его можно определить как два расстояния между проекциями этих точек на соответствующие оси координат (если задача решается на плоскости).

В качестве единицы анализа точности изделия на этапе разработки КД прием параметризованный ППТ, который будем рассматривать как ПТ, который, в первую очередь, определяет не точность, с которой обеспечивается расстояние между двумя какими-либо точками, а точность, с которой должно обеспечиваться взаимное расположение двух точек, принадлежащих ЭМИП, в пространстве относительно друг друга.

С целью упрощения излагаемых материалов здесь и далее по тексту все рассуждения будем вести в рамках двухмерной системы координат. Поэтому, в общем случае, точность взаимного расположения двух точек в пространстве относительно друг друга может быть представлена двумя ППТ.

В настоящей работе процедуру верификации КД будем рассматривать для одного параметризованного ППТ, считая, что все рассуждения будут справедливы и для других параметризованных ППТ из состава ЭМИП.

При последующих рассуждениях будем исходить из условия, что на множестве КППТ, обеспечивающих заданную точность изделия на этапе разработки КД,

определено разбиение на классы эквивалентности по множеству ППТ, задающих точность изделия на этапе разработки ТЗ. Принятое условие позволяет считать, что одно и то же взаимное положение двух точек на плоскости относительно какой-либо оси координат может быть однозначно представлено либо с помощью одного ППТ, либо с помощью множества КППТ, эквивалентных исходному ППТ по соответствующему классу эквивалентности.

Будем считать, что любой ПТ (ППТ или ПКТ) является системой, которая включает в себя имя ПТ и множество атрибутов, в число которых входят номинальное значение ПТ и допуски.

Имена ПТ могут принадлежать разным ЭМИ (ЭМИП или ЭМИК) и, соответственно, иметь различную иерархию имён (в зависимости от уровня иерархии, на котором они входят в ЭМИ), а атрибуты ПТ (независимо от их принадлежности) могут иметь различное значение, но всегда будут выражаться в рамках единой метрической системе измерений.

Примечание 2. Все используемые далее по тексту обозначения имён, значений и т.д. принимаются условно только с целью пояснения сущности метода. Для реализации метода на практике необходимо дополнительно провести процедуру **постпараметризации**, которая заключается в присвоении всем переменным, привлекаемым к процедуре верификации, собственных уникальных имён и значений.

На рис. 1 показана графическая интерпретация параметризованного ППТ как элемента, задающего в ЭМИП требования по точности.

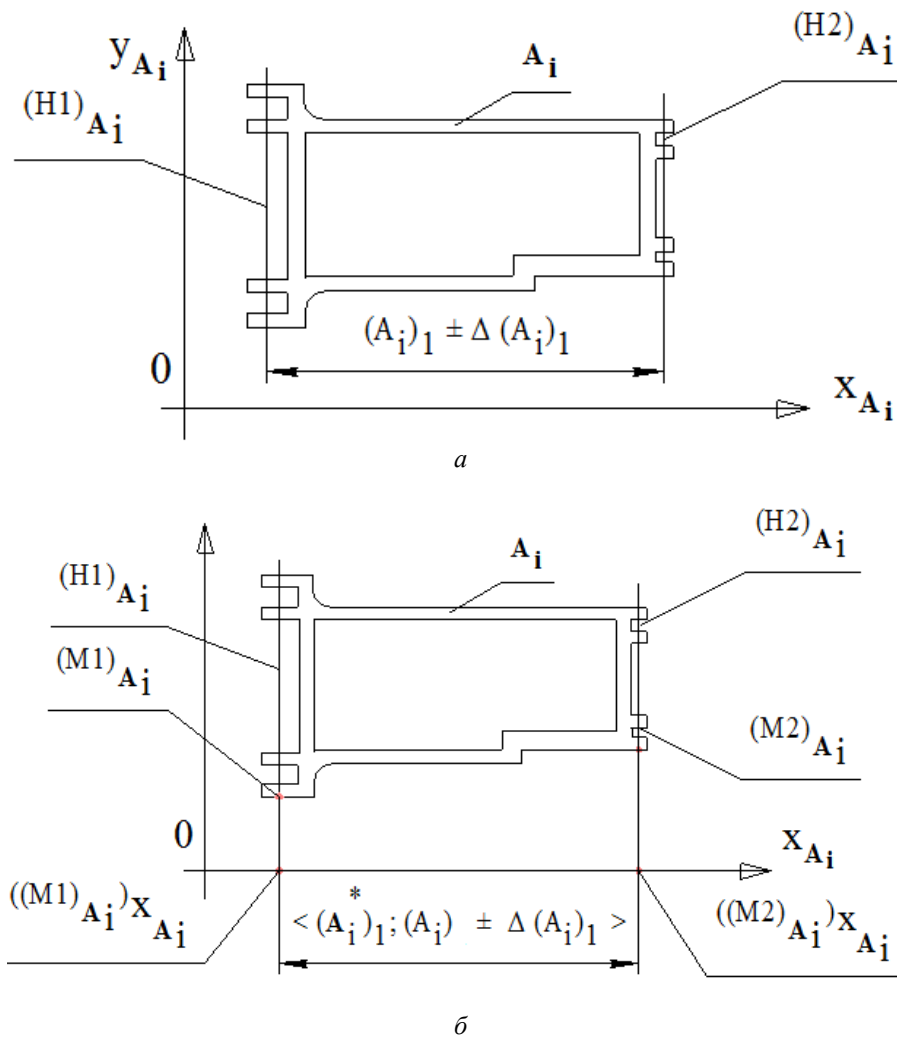


Рис. 1. Графическая интерпретация типового проектного параметра точности:
 а – традиционная форма представления проектного параметра точности
 в виде размера с допуском " $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ ";
 б – представление типового проектного параметра точности с помощью БТ

На рис. 1, а показана некоторая ЭМПМ A_i , входящая в состав ЭМИП, построенная в рамках системы координат x_{A_i} 0 y_{A_i} , на которой показан параметризованный ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$, который определяет точность расстояния между осями $(H1)_{A_i}$ и $(H2)_{A_i}$ в таком виде, в каком он обычно указывается на модели (и в КД).

Здесь индекс «1» при A_i означает порядковый номер номинального значения ППТ в составе ЭМПМ A_i , а значок « $\pm \Delta$ » указывает на то, что это допуск на номинальное значение.

В действительности для любой ЭМПМ типа A_i все ППТ взаимосвязаны между собой. Так, например, для ЭМПМ A_i , показанной на рис. 1, а, к осям $(H1)_{A_i}$ и $(H2)_{A_i}$ предъявляются требования по отклонению от вертикальности с заданной точностью (в данном примере эти требования не рассматриваются).

Возникает вопрос, от каких баз необходимо отсчитывать ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ в пространстве, если указывается расстояние между двумя непараллельными линиями?

Введём в ЭМПМ A_i две точки $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ на осях $(H1)_{Ai}$ и $(H2)_{Ai}$, как это показано на рис. 1, б, и спроецируем их на ось x_{Ai} . Как видно из рисунка, ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ замыкается на проекции этих точек $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$ и $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$ и при этом определяется однозначно. В то же время ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ становится независимым от осей $(H1)_{Ai}$ и $(H2)_{Ai}$.

Назовём введённые таким образом точки базовыми точками (БТ) и отметим, что данные БТ представляют собой идеализированные абстрактные элементы, поскольку реально в местах их введения в ЭМИП могут быть пустые места. Вместе с тем, введение БТ позволяет более точно указывать базы, от которых отсчитываются ППТ, и делает эти ППТ независимыми друг от друга в пределах ЭМИП. Главным условием для точного определения баз здесь является правильность введения БТ в ЭМИП.

Дадим ППТ, размещённому между проекциями $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$ и $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$ точек $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ на ось x_{Ai} , собственное уникальное имя « $(A_i^*)_1$ », а к множеству его атрибутов отнесём выражение « $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ », которое далее будем считать значением ППТ $(A_i^*)_1$.

Систему $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$, в которой:

- $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ – две БТ, на проекции которых замыкается ППТ;

- $(A_i^*)_1$ – имя ППТ в выбранной системе обозначений;

- $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ – значение ППТ $(A_i^*)_1$,

назовём типовым проектным параметром точности (ТППТ) и дадим ему следующее определение.

Определение 3. «Типовым проектным параметром точности называется идентифицированный (поименованный) параметризованный параметр точности, определяющий взаимное положение двух идентифицированных точек относительно друг друга, имеющий номинальное значение и допуски, выраженные в единой метрической системе измерений».

Введённый таким образом ТППТ $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ становится неотъемлемым атрибутом ЭМИП и сохраняется в ней в неизменном виде на всех последующих этапах ЖЦС изделия.

Процедуру обеспечения требований по точности изделия на этапе разработки КД будем формально рассматривать как процесс структурного и параметрического синтеза неизвестного множества элементов КППТ, реализующих в ЭМИК требования по точности, заданные ТППТ $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$.

Будем считать, что:

- структурный синтез множества КППТ – это определение множества имён КППТ, которые в совокупности должны замыкаться на проекции $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$ и $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$ БТ $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ на соответствующую ось (в рассматриваемом случае – на ось x_{Ai});

- параметрический синтез множества КППТ – это определение численных значений всех КППТ, которые были определены по результатам структурного синтеза.

Полученное таким образом множество КППТ автоматически становится множеством параметризованных КППТ.

Рассмотрим процесс обеспечения точности изделия на этапе разработки КД для ТППТ

$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$, который приведён на рис. 2.

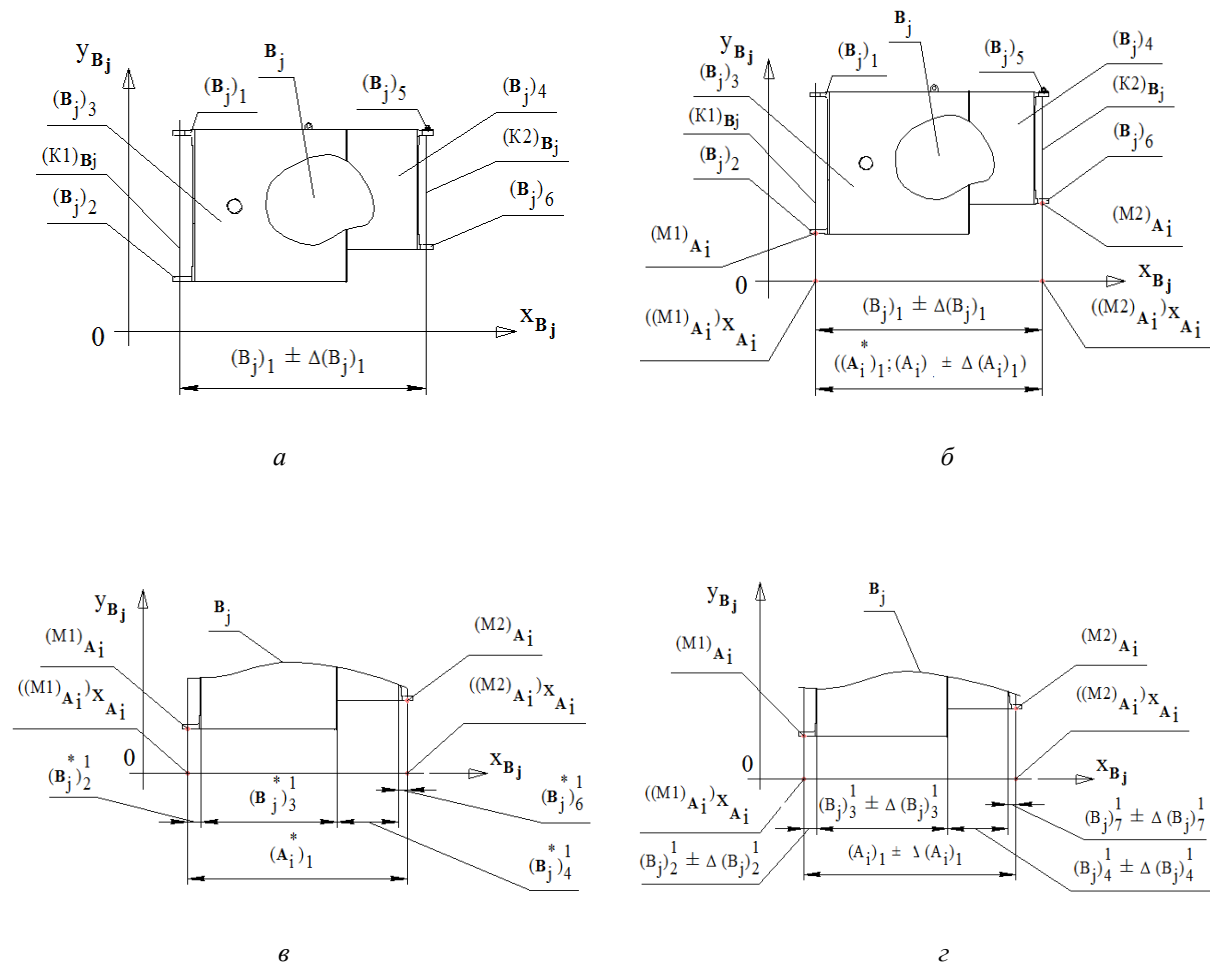


Рис. 2. Обеспечение точности изделия на этапе разработки КД:
 а – без использования ТППТ; б – с использованием ТППТ; в – на стадии структурного синтеза точности изделия с использованием ТППТ; г – на стадии параметрического синтеза точности изделия с использованием ТППТ

На рис. 2, а показана ЭМСЕ B_j , полученная на этапе разработки КД по исходным данным, заданным с помощью ЭМПМ A_i и ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$, взятым из рис. 1, а.

В состав ЭМСЕ B_j входят детали $(B_j)_1, (B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4, (B_j)_5, (B_j)_6$, которые разрабатывались отдельно, а затем компоновались в сборочную единицу B_j в рамках единого файла. Роль осей $(H1)_{A_i}$ и $(H2)_{A_i}$ в сборочной единице B_j выполняют оси $(K1)_{B_j}$ и $(K2)_{B_j}$, расстояние между которыми представлено параметризованным КППТ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$. Здесь КППТ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ представляет

собой сборочную РЦ, звеньями которой являются поддетальные параметризованные КППТ, входящие в состав деталей $(B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4$ и $(B_j)_6$.

Как следует из рис. 2, а, между размерами $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ и ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ отсутствует прямая связь. Для того, чтобы обеспечить процедуру верификации, необходимо обратиться к ЭМИП и получить из неё данные по ППТ $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$, выполнив при этом ряд неформализованных процедур.

На рис. 2, б показана ЭМСЕ B_j , полученная на этапе разработки КД по ис-

ходным данным, заданным ЭМПМ A_i и ТППТ $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$.

Здесь БТ $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ автоматически становятся принадлежностью ЭМИК, а ТППТ

$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$, заключённый между ними, становится моделью распределения пространства для множества КППТ, которые в совокупности должны замыкаться на проекции $((M1)_{Ai})_{X_{Ai}}$ и $((M2)_{Ai})_{X_{Ai}}$ БТ $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ на соответствующую ось координат.

Как видно из рис. 2, в, между размерами $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ и $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ появляется прямая связь. Однако, чтобы перейти к выполнению процедуры верификации, необходимо сначала подтвердить, что параметризованный ПКТ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ действительно соответствует тому значению, которое указано для него для ЭМСЕ B_j .

Процесс структурного и параметрического синтеза параметризованных ПКТ, входящих в качестве звеньев в сборочную РЦ, образованную ПКТ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$, в настоящей работе не рассматривается. Он представляет собой ряд неформальных процедур, которые выполняются вручную. Но при этом процесс структурного и параметрического синтеза звеньев РЦ и их значений происходит в интерактивном режиме на экране компьютера с прямым доступом к САД-информации, заложенной в ЭМСЕ B_j .

На рис. 2, в показаны результаты структурного синтеза множества парамет-

ризованных КППТ, которые входят в состав размерных баз деталей $(B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4$ и $(B_j)_6$, и в совокупности образуют сборочную РЦ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$, представленную параметризованными КППТ $(B_j^*)_2^1, (B_j^*)_3^1, (B_j^*)_4^1$ и $(B_j^*)_7^1$.

На рис. 2, г показан параметрический синтез множества параметризованных ПКТ, значения которых определяются из размерной базы соответствующих деталей $(B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4$ и $(B_j)_6$.

Как следует из рис. 2, г, в результате параметрического синтеза получим следующее множество параметризованных КППТ:

$$\begin{aligned} & (B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1; \\ & (B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1; \\ & (B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1; \\ & (B_j)_7^1 \pm \Delta(B_j)_7^1. \end{aligned}$$

Данное множество КППТ замыкается на БТ $(M1)_{Ai}$ и $(M2)_{Ai}$ и образует кортеж

$$\langle (M1)_{Ai}; (((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)); ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Значение множества параметризованных КППТ, включённых в данный кортеж, должно соответствовать значению ПКТ $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$.

Процедура верификации должна подтвердить соответствие друг другу значений, представленных кортежами

$$\begin{aligned} & \langle (M1)_{Ai}; (((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + \\ & + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)); ((M2)_{Ai}) \rangle \end{aligned}$$

и

$$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Здесь под соответствием будет пониматься выполнение следующих условий:

- $\langle (A_i)_1 \rangle = \langle (B_j)_2^1 + (B_j)_3^1 + (B_j)_4^1 + (B_j)_6^1 \rangle$;
- $\langle +\Delta(A_i)_1 \rangle \leq \langle (+\Delta(B_j)_2^1) + (+\Delta(B_j)_3^1) + (+\Delta(B_j)_4^1) + (+\Delta(B_j)_6^1) \rangle$;
- $\langle +\Delta(A_i)_1 \rangle \geq \langle (-\Delta(B_j)_2^1) + (-\Delta(B_j)_3^1) + (-\Delta(B_j)_4^1) + (-\Delta(B_j)_6^1) \rangle$.

Компьютерная визуализация метода контроля над точностью изделия

Обращаясь к процедуре верификации КД на соответствие требованиям ТЗ, сложно рассчитывать на полноту анализа, поочерёдно обращаясь непосредственно к ЭМИП и ЭМИК, поскольку мощность множества размеров, определяющих точность изделия в ЭМИП, может иметь второй и более порядки, а мощность множества размеров, определяющих точность изделия в ЭМИК, – третий и более порядки.

Поэтому предлагается создать матрицу точности, которая представляет собой таблицу, состоящую из трёх разделов и ограниченного множества строк.

Левый и правый разделы содержат в себе информацию по точности изделия на этапах разработки ТЗ и КД, а средний раздел содержит информацию о результатах процедуры верификации КД на соответствие требованиям ТЗ по точности изделия.

Каждая строка матрицы точности включает в себя информацию по одному ТППТ и множеству КППТ, которые располагаются в ЭМИП и ЭМИК между соответствующими двумя БТ, являющимися общими для обеих моделей.

Число столбцов в среднем разделе может быть разным, в зависимости от формы представления результатов верификации. В простейшем случае раздел может иметь один столбец, в котором результат верификации может быть представлен качественно в виде оценки типа «да-нет».

На этапе разработки ТЗ заполняется левый раздел матрицы точности.

Заполнение раздела должно проводиться представителями проектного отдела, которые являются авторами требований по точности изделия. Процедура заполнения матрицы точности проводится индивидуально путём введения конкретным исполнителем (коллективом исполнителей) в отдельную строку соответствующей информации по каждому ТППТ с последующим подтверждением завершения операции электронной подписью. Число строк в матрице точности должно соответствовать числу ТППТ, приведённых в ЭМИП.

Порядок заполнения матрицы может быть различным. Важно, чтобы каждый ТППТ, представленный в ЭМИП, нашёл своё отображение в левом разделе матрицы точности. Факт полного заполнения матрицы точности на этапе ТЗ также должен обязательно подтверждаться электронной подписью.

Заполнение правого раздела матрицы точности может выполняться либо по мере разработки КД, либо после её завершения. Процесс заполнения матрицы точности на этапе разработки КД аналогичен процессу её заполнения на этапе разработки ТЗ и также должен обязательно подтверждаться соответствующими электронными подписями.

Будет считаться, что заданная точность конструкции изделия на этапе разработки КД обеспечивается, если мера точности каждой сборочной РЦ из правого раздела матрицы точности соответствует требованиям соответствующего ТППТ из левого раздела. Если хотя бы для одного из ТППТ требования по точности не соответствуют своему заданному значению, то точность изделия не обеспечивается.

Имя первой точки	Имя ТППТ	Значение ТППТ	Имя второй точки	Значение верификации	Имя первой точки	Множество имён КППТ	Значение сборочной РЦ	Имя второй точки
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
$(M1)_{Ai}$	$(A_i^*)_1$	$(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$	$(M2)_{Ai}$	«ДА-НЕТ»	$(M1)_{Ai}$	$(B_j^*)_2$ $(B_j^*)_3$ $(B_j^*)_4$ $(B_j^*)_6$	$((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)$	$(M2)_{Ai}$
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•

Рис. 3 Пример матрицы точности

На рис. 3 показан один из возможных вариантов структуры матрицы точности и показан пример её заполнения для ТППТ:

$$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Необходимо отметить, что при заполнении матрицы точности можно использовать САД-информацию из ЭМПМ A_i и ЭМСЕ B_j , выделив информацию, представленную на рис. 1, б, рис. 2, в, рис. 2, з, в виде отдельных слайдов.

Заключение

Предлагаемый метод контроля над точностью изделия на этапе разработки КД не требует доработки используемых

САПР и не требует адаптации к нему существующей методологии РА.

При проведении верификации метод обеспечивает контроль каждого ТППТ из матрицы точности и может быть использован на практике при условии разработки метода **постпараметризации** (введение БТ и присвоение индивидуальных имён для каждого ТППТ), при помощи которого должна быть обеспечена подготовка и формализация информации, связанной с оформлением матрицы точности.

Матрица точности позволяет проводить контроль точности (в том числе аудиторский) путём проведения верификации точности вручную или (при минимальной адаптации аппарата расчёта РЦ) с использованием компьютерной техники.

Библиографический список

1. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчёта линейных и угловых цепей: метод. указания. М.: Изд-во стандартов, 1987. 45 с.
2. Солонин И.С., Солонин С.И. Расчёт сборочных и технологических размерных цепей. М.: Машиностроение, 1980. 110 с.
3. Корчак С.Н., Гузеев В.И., Буторин Г.И., Выбойщик В.Н., Кулыгин В.Л., Шамин В.Ю. Размерно-точностное проектирование технологических процессов обработки на основе расчёта технологических размерных цепей: учеб. пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 101 с.
4. ГОСТ 2.051-2006. Электронные документы. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011.
5. ГОСТ 2.052-2006. Электронная модель изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011.
6. ГОСТ 2.053-2006. Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2007.
7. Шехонин А.А., Домненко В.М., Гаврилина О.А. Методология проектирования оптических приборов: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 91 с.
8. ГОСТ ISO 9000 – 2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2012. 32 с.
9. ГОСТ 21778-81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1989.
10. Шамин В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: компьютерная версия учеб. пособия. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 530 с.
11. Платонов К.К. Структура и развитие личности. М.: Наука, 1986. 256 с.

Информация об авторах

Еленев Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения, декан фа-

культета заочного обучения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: astra@ssau.ru. Область научных интересов: автоматизация проектирования летательных аппаратов.

Шупляк Юрий Петрович, ведущий инженер-конструктор, ОАО «РКЦ

«Прогресс», г. Самара. E-mail: yuashuplyak@mail.ru. Область научных интересов: инженерный анализ механического взаимодействия составных частей космических комплексов.

ACCURACY CONTROL METHOD FOR SPACE COMPLEX PRODUCTS AT THE STAGE OF DESIGN ENGINEERING

© 2014 V. D. Yelenev¹, Yu. P. Shuplyak²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Joint Stock Company “Space Rocket Center “Progress”, Samara, Russian Federation

The paper discusses the tasks of controlling the required accuracy of space complex products at the stage of design engineering.

The product accuracy at the stage of design engineering is viewed as a system characteristic encompassing the whole set of singular requirements for product accuracy defined at the stage of the draft proposal.

The method is based on the concept of a standardized accuracy design property which is used to fix the whole number of singular requirements for product accuracy defined by the draft proposal. All the requirements for the product accuracy implemented at the stage of design engineering are reduced to a reference quantity of standardized accuracy design properties defined in the draft proposal to confirm (or disconfirm) their matching each other.

Accuracy, dimensional analysis, calculation of dimensional chains, verification, digital mock-up, standardized accuracy design property, metric space.

References

1. RD 50-635-87. Dimensional chain. Basic concepts. Methods of calculation of linear and angular chains. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1987. 45 p. (In Russ)
2. Solonin I.S., Solonin S.I. Raschet sborochnykh i tekhnologicheskikh razmernykh tsepey [Calculation of assembly and technological dimension chains]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 110 p.
3. Korchak S.N., Guzeev V.I., Butorin G.I., Vyboyshchik V.N., Kulygin V.L., Shamin V.Yu. Razmerno-tochnostnoe proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki na osnove rascheta tekhnologicheskikh razmernykh tsepey. Uchebnoe posobie [Size-precision design of technological processes on the basis of calculation of technological dimensional chains]. Chelya p.
4. GOST 2.051-2006. Electronic documents . General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. (In Russ.)
5. GOST 2.052-2006. Electronic product model . General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. (In Russ.)
6. GOST 2.053-2006. Electronic structure of the product. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2007. (In Russ.)
7. Shekhonin A.A., Domnenko V.M., Gavrilina O.A. Metodologiya proektirovaniya opticheskikh priborov. Uchebnoe posobie [Methodology of designing optical instruments]. SPb.: St.-Petersburg ITMO Univ. Publ., 2006. 91 p.
8. GOST ISO 9000 – 2011. Quality management system. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform Publ., 2012. 32 p. (In Russ)
9. GOST 21778-81. System of ensuring the accuracy of geometrical parameters in civil engineering. Fundamentals. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (In Russ)
10. Shamin V.Yu. Teoriya i praktika resheniya konstruktorskikh i tekhnolog-

icheskih razmernykh tsepey. Komp'yuternaya versiya uchebnogo posobiya [Theory and practice of design and technological dimension chains. Computer version of the training manual]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2005. 530 p.

11. Platonov K.K. Struktura i razvitie lichnosti [Structure and development of the individual]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 256 p.

About the authors

Valeriy Dmitriyevich Yelenev, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Space Engineering, Dean of the Faculty of Correspondence and Distant Learning, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: astra@ssau.ru. Area of Research: computer-aided design of spacecraft.

Yuriy Petrovic Shuplyak, Leading Design Engineer, Joint Stock Company "Space Rocket Center "Progress", Samara, Russian Federation. E-mail: yuashuplyak@mail.ru. Area of Research: engineering analysis of mechanical interaction between the constituent elements of space complexes.

УДК 629.78

ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА – СБОРЩИКА МУСОРА С ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ МАЛОЙ ТЯГИ

© 2014 С. А. Ишков, Г. А. Филиппов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассматривается проблема засорения околоземного космического пространства. Исследуется способ очистки от крупногабаритных фрагментов космического мусора с помощью космического аппарата – сборщика мусора с электроракетным двигателем малой тяги. Построена массовая модель космического аппарата одноразового и многоразового применения. Рассматривается баллистическая схема, предусматривающая перелёт космического аппарата с орбиты ожидания на орбиту расположения космического мусора, его спуск на поверхность Земли и возвращение многоразового космического аппарата на орбиту ожидания. Для предложенного критерия оценки эффективности транспортной операции и введённого допущения о постоянстве ускорения от тяги получены аналитические соотношения для расчёта проектных параметров космического аппарата. Результаты расчёта проектных параметров представлены в обобщённом виде.

Космический мусор, космический аппарат - сборщик мусора, критериальная функция, приведённая характеристическая скорость, проектные параметры, общий ресурс.

Космический мусор (далее КМ) – это все искусственные объекты и их фрагменты в космосе, которые неуправляемы, не функционируют и не могут служить полезным целям, но являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты (КА).

КМ принято делить на несколько категорий: 1) объекты диаметром менее 1 см; 2) объекты диаметром 1–10 см и 3) объекты диаметром более 10 см. Многие из этих объектов являются наблюдаемыми и занесены в специальные каталоги. Расположение объектов космического мусора принято делить на уровни в зависимости от количества на них объектов: на околоземной орбите (400 – 600 км над Землёй), на геостационарной орбите (35786 км над Землёй) и на высотах 1000 – 2000 км над Землёй [1].

Предлагаемые меры для борьбы с космическим мусором можно разделить на две группы: пассивные (упреждающие) и активные способы. Под активными способами чаще всего подразумевают создание специальных КА – так называемых сборщиков мусора (КАСМ), которые вводили бы фрагменты КМ на низкие предспусковые орбиты, с которых они бы вхо-

дили в плотные слои атмосферы. Особо востребованной на сегодняшний день для таких аппаратов является задача удаления элементов КМ в окрестности космической станции – наиболее уязвимо и дорогостоящего космического объекта.

Большую опасность представляют собой крупные элементы КМ – космические аппараты, ступени разгонных блоков, прекратившие своё активное функционирование. Такие объекты, как правило, не сгорают полностью в атмосфере и при своём падении на Землю могут привести к серьёзным разрушениям. Кроме того, достоверный прогноз точки падения таких объектов при самоторможении является сложной технической задачей. Обеспечение спуска и утилизации крупных элементов КМ в заданном районе земной поверхности является важной и актуальной задачей, которая может быть решена КАСМ.

Применение электрореактивных двигателей (ЭРД) малой тяги на КАСМ является оправданным [2], поскольку они обладают высоким удельным импульсом и позволяют создать аппараты малой массы и длительного функционирования. ЭРД на таких аппаратах могут быть ис-

пользованы как в качестве маршевых двигателей, так и двигателей системы ориентации, системы сближения и причаливания. В настоящее время для задачи сбора КМ рассматриваются аппараты двух типов. Первый тип представляют собой аппараты одноразового применения («космический камикадзе» [3]), второй – аппараты многоразового применения с возможностью их дозаправки.

Предусматривается следующая баллистическая схема функционирования таких КА. КАСМ выводится на орбиту ожидания высотой 300 – 400 км. Служба слежения за КМ определяет координаты фрагмента КМ, который необходимо спустить с орбиты. Бортовая система управления КАСМ рассчитывает программу управления и реализует перелёт к заданному объекту, сближается с ним и с помощью специальных устройств фиксирует его на своём борту.

Далее, если это позволяют технические условия, может быть осуществлена операция сближения с другим элементом КМ с последующей их фиксацией на борту. После сбора КМ осуществляется перелёт КАСМ на низкую предпусковую орбиту и пребывание на ней до наступления необходимых условий для спуска. Далее осуществляется операция управления спуском и КМ входит в плотные слои атмосферы, сгорает в ней или утилизируется в заданном районе Земли.

Многоразовый КАСМ после отделения от него КМ возвращается на орбиту ожидания, при необходимости дозаправляется топливом и готовится к новой операции. Описанный рабочий цикл многоразового КАСМ повторяется.

Современные методики проектирования КА предполагают итерационность процесса выбора проектных и баллистических параметров. В данной работе рассматривается так называемая «нулевая» итерация проектного выбора, определяющая область искомых параметров на базе простейших моделей и упрощённых баллистических схем перелёта.

1. Введём в рассмотрение следующую массовую модель КАСМ одноразового применения [4]:

$$M_0 = M_e + M_T + M_C, \quad (1)$$

где M_0 – начальная (стартовая) масса аппарата; M_e – часть массы аппарата, зависящая от эффективной (тяговой) мощности бортовой энергоустановки; M_T – часть массы аппарата, зависящая от времени активного функционирования аппарата; M_C – постоянная часть массы аппарата, включающая массы: конструкции, систем управления и навигации, системы захвата и фиксации КМ и прочие фиксированные по величине массы.

Компоненты M_e и M_T представим в следующем виде:

$$M_e = \gamma \cdot \frac{P \cdot C}{2}; \quad M_T = t \left(\frac{P}{C} + m_c \right), \quad (2)$$

где P – суммарная тяга маршевых двигателей; C – скорость истечения реактивной струи; t – суммарное время выполнения операции; m_c – усреднённый секундный расход массы рабочего тела на поддержание заданной ориентации; γ – удельная масса тягового энергетического ресурса, учитывающая массу энергоустановки с учётом потерь и деградации элементов системы со временем, КПД двигательной установки и прочее.

Введём следующие допущения:

1. Скорость истечения C и тяга P остаются постоянными в течение всего срока функционирования аппарата.

2. Ускорение от тяги на каждом из этапов считается постоянной величиной, рассчитываемой для средней массы аппарата.

Суммарное время выполнения операции запишется следующим образом:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{V_{x1}}{w_1} + \frac{V_{x2}}{w_2}. \quad (3)$$

Здесь V_{x1}, V_{x2} – затраты характеристических скоростей на первом и втором участках; w_1, w_2 – средние ускорения от тяги, которые в соответствии с принятыми допущениями определяются как:

$$w_1 = \frac{P}{M_0 - M_{t1}/2} = \frac{w_0}{k_1}, \quad (4)$$

$$w_2 = \frac{P}{M_0 - M_{t1} - M_{t2}/2 + M_{KM}} = \frac{w_0}{k_2}, \quad (5)$$

где M_{t1}, M_{t2} – расход рабочего тела по участкам; M_{KM} – масса присоединяемого фрагмента КМ; w_0 – начальное ускорение от тяги; k_1, k_2 – поправочные коэффициенты, определяемые следующим образом:

$$k_1 = 1 - \frac{M_{t1}}{2 \cdot M_0}, \quad k_2 = 1 - \frac{M_{t1}}{M_0} - \frac{M_{t2}}{2 \cdot M_0} + \frac{M_{KM}}{M_0}. \quad (6)$$

Сформулируем задачу проектного синтеза в следующем виде:

для известных или заданных величин $M_0, M_{KM}, M_C, V_{x1}, V_{x2}, \gamma$, определим C и P из условия минимума времени:

$$C_{opt}, P_{opt} = \arg \min(t). \quad (7)$$

В соответствии с итерационной схемой выбора проектных параметров будем полагать, что при решении задачи (7) поправочные коэффициенты k_1 и k_2 , и затраты массы на поддержание заданной ориентации $T \cdot m_C$ не зависят от проектных переменных P и C .

Запишем уравнения баланса массы и баланса времени:

$$M_0 = \gamma \cdot \frac{P \cdot C}{2} + \frac{t \cdot P}{C} + M_C, \quad (8)$$

$$T = (V_{x1} \cdot k_1 + V_{x2} \cdot k_2) / w_0 = V_x^* / w_0. \quad (9)$$

В уравнении (8) затраты массы на поддержание заданной ориентации $T \cdot m_C$ включены в постоянную часть массы аппарата M_C , в уравнении (9)

$V_x^* = V_{x1} \cdot k_1 + V_{x2} \cdot k_2$ – приведённая суммарная характеристическая скорость операции.

Определим w_0 из уравнения (8) после деления правой и левой части на M_0 :

$$w_0 = \frac{(1 - \mu_C)}{\gamma \cdot C / 2 + t / C}, \quad (10)$$

$$\text{где } \mu_C = \frac{M_C}{M_0}.$$

Подставим данное соотношение в уравнение (9), выразим из него в явном виде t и после преобразований получим:

$$t = \frac{\gamma \cdot C^2 \cdot V_x^*}{2 \cdot C \cdot (1 - \mu_C) - V_x^*}. \quad (11)$$

Определяя производную t по C и приравнявая её к нулю, получаем решение задачи:

$$C_{opt} = \frac{2 \cdot V_x^*}{(1 - \mu_C)}. \quad (12)$$

Подставляя данное решение в выражения (9), (10), получим:

$$w_{0opt} = \frac{(1 - \mu_C)^2}{2 \cdot \gamma \cdot V_x^*}, \quad t_{min} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot V_x^{*2}}{(1 - \mu_C)^2}, \quad (13)$$

$$P_{opt} = \frac{M_0 \cdot (1 - \mu_C)^2}{2 \cdot \gamma \cdot V_x^*}. \quad (14)$$

2. Рассмотрим вариант многократного использования КАСМ. Будем полагать, что операция на одном цикле выполняется

в течение времени t_M (моторное время), а временами ожидания и пассивного полёта будем пренебрегать.

Тогда с учётом введённых выше допущений можно записать:

$$t_M = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{V_{x1}}{w_1} + \frac{V_{x2}}{w_2} + \frac{V_{x3}}{w_3}, \quad (15)$$

где t_3, V_{x3} – затраты времени и характеристической скорости на этапе перелёта с низкой предпусковой орбиты на орбиту ожидания и дозаправки.

Средние значения ускорений w_1, w_2 определяются в соответствии с соотношениями (4), а w_3 определится следующим образом:

$$w_3 = \frac{P}{\left(M_0 - M_{T1} - M_{T2} - \frac{M_{T3}}{2} \right)} = \frac{w_0}{k_3}, \quad (16)$$

где k_3 – поправочный коэффициент, определяемый как:

$$k_3 = 1 - \frac{M_{T1}}{M_0} - \frac{M_{T2}}{M_0} - \frac{M_{T3}}{2 \cdot M_0}. \quad (17)$$

Аналогично соотношению (8) можно записать:

$$t_M = (V_{x1} \cdot k_1 + V_{x2} \cdot k_2 + V_{x3} \cdot k_3) / w_0 = Vx^* / w_0, \quad (18)$$

где Vx^* – приведённая характеристическая скорость затрат на одном цикле многофазовой операции.

Пусть общий ресурс по времени КАСМ ограничен величиной T , которая задана. Тогда количество циклов n , которое совершит КАСМ за время своей работы, определится следующим образом:

$$n = \frac{T \cdot w_0}{V_x^*}. \quad (19)$$

В качестве критерия оптимизации при выборе проектных параметров многофазового КАСМ введём в рассмотрение критериальную функцию J как отношение общей выводимой на орбиту массы (с учётом массы дозаправляемого рабочего тела) к суммарной величине приведённой характеристической скорости, потраченной на сбор и спуск с орбиты космического мусора:

$$J = \frac{(M_0 + (n-1) \cdot M_T)}{n \cdot V_x^*} \rightarrow \min. \quad (20)$$

Данная функция будет характеризовать эффективность понесённых затрат на сбор и утилизацию фрагментов космического мусора, находящегося на разных орбитах. Распишем составляющие массы M_T и M_0 следующим образом:

$$M_T = \frac{t_M \cdot P}{C} = \frac{M_0 \cdot Vx^*}{C}, \quad (21)$$

$$M_0 = \frac{\gamma \cdot w_0 \cdot M_0 \cdot C}{2} + \frac{M_0 \cdot Vx^*}{C} + M_C. \quad (22)$$

Преобразуем критериальную функцию (20) с учётом (21) и (22). После преобразований получим:

$$J = \frac{M_C \left(1 + \frac{T \cdot w_0}{C} - \frac{V_x^*}{C} \right)}{\left(1 - \frac{\gamma \cdot w_0 \cdot C}{2} - \frac{V_x^*}{C} \right) \cdot T \cdot w_0} \rightarrow \min. \quad (23)$$

Таким образом, проектная задача сводится к определению начального ускорения от тяги W_0 и скорости истечения реактивной струи C из условия минимума функции (23):

$$C_{opt}, w_{0opt} = \arg \min \left(J(C, w_0, T, \gamma, V_x^*, M_C) \right). \quad (24)$$

Остальные параметры в (24) считаются заданными.

3. Найдём решение задачи (20) для ряда частных случаев.

Пусть в первом случае $w_0 = \text{const}$. Определим производную от J по C и, приравняв её к нулю, получим квадратное уравнение. Решение данного уравнения запишется в виде:

$$C_{opt}^* = \sqrt{(T \cdot w_0 - V_x^*)^2 + \frac{2 \cdot T}{\gamma}} - (T \cdot w_0 - V_x^*), \quad (25)$$

где C_{opt}^* – оптимальное значение скорости истечения при заданном начальном ускорении от тяги w_0 .

Рассмотрим второй случай. Пусть $C = \text{const}$.

Определим производную от J по w_0 и, приравняв её к нулю, получим решение:

$$w_{0\ opt}^* = \frac{C - V_x^*}{T} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot T}{\gamma \cdot C^2}} - 1 \right), \quad (26)$$

где $w_{0\ opt}^*$ – оптимальное значение начального ускорения от тяги при заданной скорости истечения C . Определение оптимальных значений C и w_0 позволяет вычислить, как и в случае одноразового аппарата, все остальные основные проектные параметры КАСМ.

При больших значениях количества циклов n оптимальная скорость истечения C_{opt} будет слабо зависеть от V_x^* . Тогда приближённо можно записать:

$$C_{opt} \approx \sqrt{V_{x\Sigma} + 2\tilde{T}} - V_{x\Sigma}^*, \quad (27)$$

где $\tilde{T} = \frac{T}{\gamma}$ – приведённый ресурс,

$V_{x\Sigma}^* = n \cdot V_x^*$ – приведённые суммарные затраты характеристической скорости.

Выражение для критериальной функции и функции $\mu_C = \frac{M_C}{M_0}$ с учётом введённых переменных можно преобразовать к виду:

$$\tilde{J} = \frac{J}{M_C} = \frac{1 + \frac{1}{C} \cdot (V_{x\Sigma}^* - V_x^*)}{\left(1 - \frac{V_{x\Sigma}^* \cdot C}{2\tilde{T}} - \frac{V_x^*}{C} \right) \cdot V_{x\Sigma}^*}, \quad (28)$$

$$\mu_C = 1 - \frac{V_{x\Sigma}^* \cdot C}{2\tilde{T}} - \frac{V_x^*}{C}. \quad (29)$$

4. Как следует из полученных соотношений (28) и (29), проектные параметры КАСМ будут существенно зависеть от приведённых затрат характеристической скорости V_x^* на совершение орбитальных транспортных операций. Минимальные затраты V_x^* могут быть определены в соответствии с теорией оптимального управления нелинейными динамическими системами.

Применение принципа максимума Понтрягина для решения этой задачи потребует решения двухточечной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В механике космического полёта с малой тягой широкое распространение получили также подходы, позволяющие определить приближённое значение этих затрат в зависимости от типов граничных условий полёта [5].

Таким образом, задача определения затрат характеристической скорости V_x^* является сложной, выходящей за рамки данной работы и требует отдельного рассмотрения. В дальнейшем, при проведении численных расчётов, V_x^* будет задана.

Проведены расчёты проектных параметров КАСМ одноразового и многоразового применения. На рис. 1, 2 представлены результаты расчётов в обобщённом

виде для КАСМ одноразового применения для различных затрат характеристической скорости V_x^* и коэффициента μ_c . На рис. 1 показаны зависимости оптимальной скорости истечения реактивной струи C_{opt} от затрат характеристической скорости

V_x^* . На рис. 2 показана зависимость отношения времени выполнения операции к удельной массе тягового энергетического ресурса от затрат характеристической скорости V_x^* .

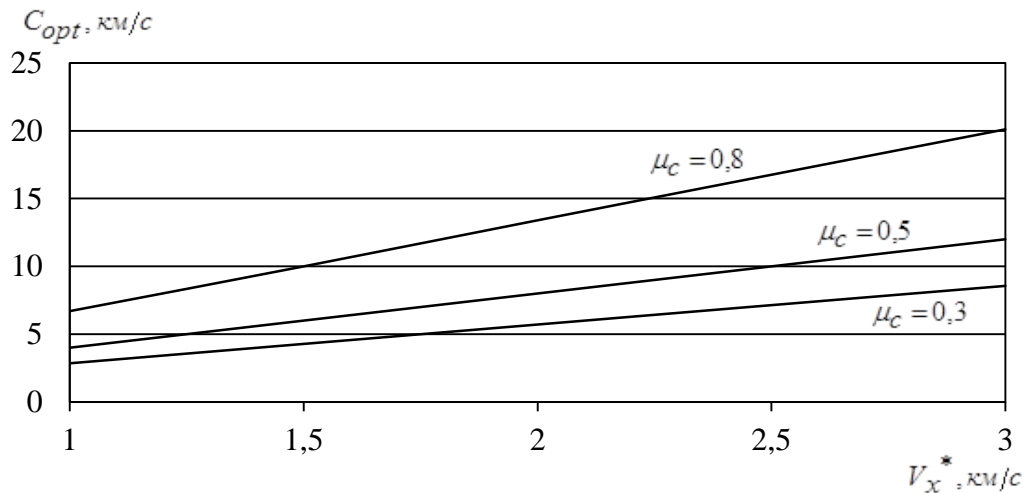


Рис. 1. Зависимости оптимальной скорости истечения реактивной струи C_{opt} от затрат характеристической скорости V_x^*

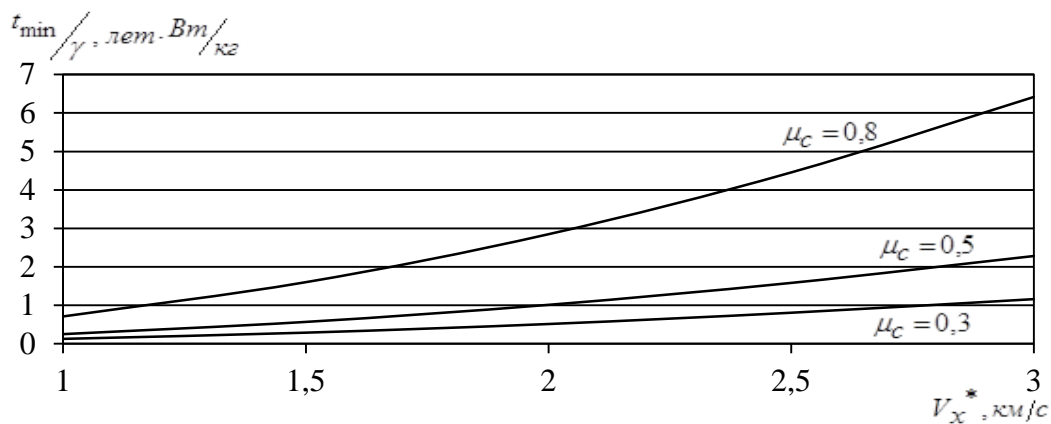


Рис. 2. Зависимость отношения минимального времени выполнения операции к удельной массе тягового энергетического ресурса от затрат характеристической скорости V_x^*

На рис. 3–5 представлены результаты расчёта, согласно (27) – (29), проектных параметров КАСМ многократного применения как функции суммарного значения заданной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^* = n \cdot V_x^*$.

Затраты приведённой характеристической скорости на одном цикле принимались равными 1 км/с.

На рис. 3 приведена зависимость оптимальной скорости истечения реактивной струи C_{opt} от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$, на рис. 4 – зависимость коэффициента μ_c от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$, на рис. 5 – зависимость критериальной функции \tilde{J} от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$.

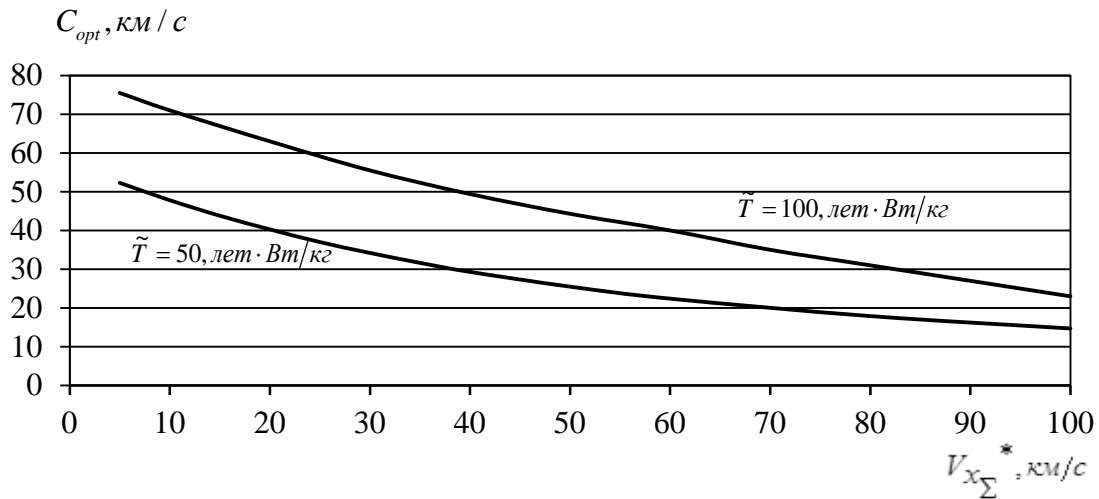


Рис. 3. Зависимость оптимальной скорости истечения реактивной струи C_{opt} от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$

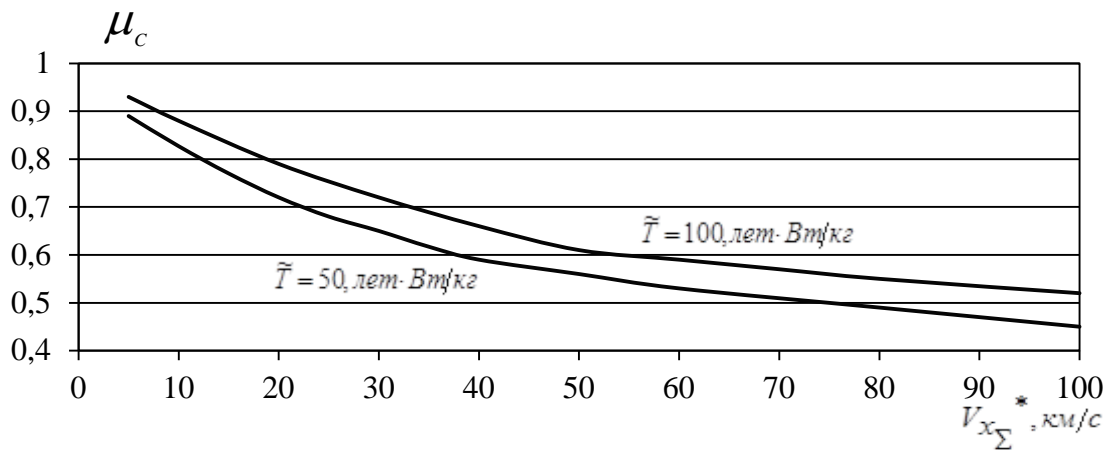


Рис. 4. Зависимость коэффициента μ_c от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$

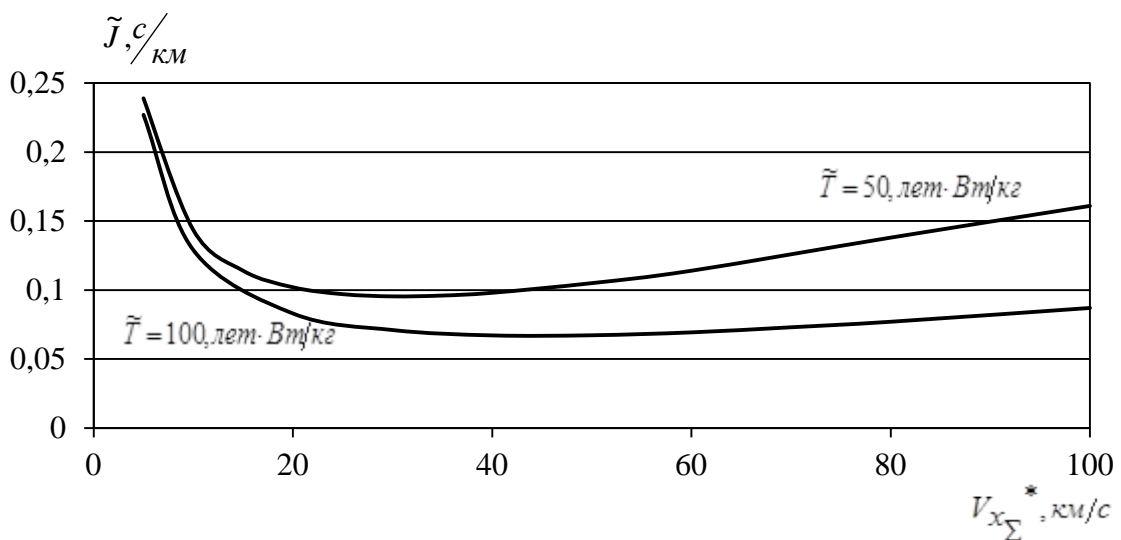


Рис. 5. Зависимость критериальной функции \tilde{J} от суммарной характеристической скорости $V_{x\Sigma}^*$

По результатам проведённых расчётов можно сделать следующие выводы:

1. Для КАСМ одноразового применения не требуется двигательная установка с высокой скоростью истечения реактивной струи (рис. 1).

2. Для КАСМ многоразового применения при увеличении суммарной приведённой характеристической скорости операции V_{x^*} оптимальная скорость истечения реактивной струи (27) должна снижаться (рис. 3). Это связано с необходимостью увеличения начального ускоре-

ния тяги для выполнения программы при фиксированном ресурсе.

3. Приведённая критериальная функция (29) имеет пологий минимум (рис. 5), что позволяет определить рациональный диапазон суммарной характеристической скорости $v_{x_{\Sigma}^*}$ от 20 км/с до 60 км/с. При окончательном выборе проектных параметров КАСМ это позволит проанализировать альтернативные варианты, исходя из других критериев.

Библиографический список

1. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2012. 192 с.

2. Alpatov A.P., Gusynin V.P. Space vehicle with electric thruster for gathering fine space debris // 59th International Astronautical Congress 2008, IAC 2008; Glasgow; United Kingdom. V. 4. С. 2494-2497.

3. Миклашевская А. Швейцария займётся уборкой в космосе // Коммерсантъ - Online, 2012.

4. Ишков С.А. Методические основы формирования проектных характеристик космического аппарата – сборщика мусора с электроракетными двигателями малой тяги // Сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Ч. 2. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013. С. 3 – 8.

5. Салмин В.В., Старинова О.Л., Ишков С.А. Методы решения вариационных задач механики космического полёта с малой тягой. Самара: СНЦ РАН, 2006. 164 с.

Информация об авторах

Ишков Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ishkov@ssau.ru. Область научных интересов: баллистика, управление движением космических аппаратов.

Филиппов Григорий Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: баллистика, управление движением космических аппаратов.

CHOICE OF DESIGN CHARACTERISTICS OF «GARBAGE COLLECTOR» SPACECRAFT WITH A LOW-THRUST ELECTROJET ENGINE

© 2014 S. A. Ishkov, G. A. Filippov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper is devoted to the problem of debris in the near-Earth space. We investigate a method of cleaning the space of large fragments of space debris using a “garbage collector” spacecraft with a low-thrust electrojet engine. A mass model of one-shot and shuttle spacecraft has been constructed. A mission trajectory plan is presented that includes the spacecraft flight from the parking orbit to that of debris location, its descent to the surface of the Earth and the return of reusable spacecraft to the parking orbit. Analytical relationships for the calculation of the spacecraft design parameters have been obtained for the proposed criterion for evaluating the effectiveness of the logistic space mission and the assumption about constant thrust acceleration. The results of calculation of the design parameters are summarized.

Space debris, «garbage collection» spacecraft, criterion function, reduced relative velocity, design parameters, total resource.

References

1. Venjaminov S.S., Chervonov A.M. Kosmicheskiy musor – ugroza chelovechestvy [Space debris - a Threat to Mankind]. Moscow: IKI RAN Publ., 2012. 192 p.
2. Alpatov A.P., Gusynin V.P. Space vehicle with electric thruster for gathering fine space debris // 59th International Astronautical Congress 2008, IAC 2008; Glasgow; United Kingdom. V. 4. C. 2494-2497.
3. Miklashevskaya A. Shvejcaria zayjmitsja uborkoj v kosmose [Switzerland will clean the space] // Kommersant – Online, 2012.
4. Ishkov S.A. Metodicheskie osnovyi formirovaniya proektnyih harakteristik kosmicheskogo apparata – sborschika musora s elektroraketnyimi dvigatelyami maloy tyagi [Methodical bases of formation of the design characteristics of the spacecraft - the garbage collector with electrorocket thrusters] // Sbornik trudov XVI Vserossiyskogo seminaro po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatel'nykh apparatov. Part 2. Samara: SNTs RAN Publ., P. 3-8. (In Russ.)
5. Salmin V.V., Starinova O.L., Ishkov S.A. Metodyi resheniya variatsionnyih zadach mehaniki kosmicheskogo polyota s maloy tyagoy [Methods of solving variational problems in low-thrust space mission mechanics]. Samara: SNTs RAN Publ., 2006. 164 p.

About the authors

Ishkov Sergey Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Spacecraft Design, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: ishkov@ssau.ru. Area of Research: ballistics, spacecraft motion control.

Filippov Gregory Aleksandrovich, engineer, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. Area of Research: ballistics, spacecraft motion control.

УДК 629.7.072.8

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАВЫКОВ КУРСАНТОВ ЛЁТНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ© 2014 Б. Ж. Куатов¹, С. Ж. Куртаев²¹Военный институт Сил воздушной обороны им. Т.Я. Бегельдинова,
г. Актобе, Казахстан²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведён анализ работ по проверке адекватности как имитационного моделирования, так и самих тренажёров. В работах ограничиваются определением факта адекватности или неадекватности проверяемых систем, что не может быть использовано для выявления приобретаемых на них навыков в соответствии с введённой обобщённой классификацией. Сама адекватность является сопутствующим признаком неадекватности применения тренажёров. Однако поскольку существующая принятая база по оценке адекватности тренажёров не позволяет её представить в виде индикатора сопутствующего признака неадекватности применения тренажёров, то первостепенной задачей является определение её количественной формы, которая позволила бы устранить несоответствие оценок обученности. В статье предлагается система оценки уровня навыков тренажа курсантов лётных специальностей. Рассмотрены некоторые положения применительно к оценке вероятностных уровней подготовленности курсантов. В работе предлагается применение оценки уровня обученности курсантов лётных специальностей по пятибалльной системе с использованием плюсов и минусов (12-балльная система) для повышения точности определения лётных навыков.

Тренажёрная подготовка, авиационные тренажёры, курсант, летательные аппараты.

Использование в тренажёре имитационных моделей с ограниченной адекватностью является одной из основных причин возникновения неадекватности применения тренажёров, заключающейся в некорректном определении содержательного компонента учебных планов тренажёрной подготовки (ТП) – количества тренировок на средствах тренажа. Вследствие ограниченной адекватности тренажёров наблюдаются взаимозависимые события:

- происходит приобретение курсантами неверных навыков по эффективным способам и тактическим приёмам применения летательного аппарата (ЛА) и его систем;

- осуществляется искажённое оценивание отрабатываемых курсантским составом учебных упражнений.

Искажённое оценивание отрабатываемых учебных упражнений происходит из-за существующего несоответствия между оценками обученности лётного состава на тренажёрах и на воздушных судах по единым упражнениям. Причиной

неадекватности обученности $\mathcal{R}(K)$ на средствах тренажа является не что иное, как наличие неучтённых навыков, которые порой являются вредными, хотя и воспринимаются как нужные [1].

Из теории психологии и педагогики известно, что навыки - это умение выполнять целенаправленные действия, доведённое до автоматизма в результате сознательного многократного повторения одних и тех же движений или решения типовых задач.

Применительно к ТП сознательное многократное повторение одних и тех же движений или решение типовых задач осуществляется в процессе тренировок на средствах тренажа [2].

Так как наличие неадекватности обученности $\mathcal{R}(K)$ приводит к возникновению неадекватности планирования ТП с использованием тренажёров, то актуальной является разработка метода адаптации содержательного компонента учебных планов, устраняющего эти неадекватности из-за ограниченной адекват-

ности тренажёров. Сама адекватность является сопутствующим признаком неадекватности применения тренажёров. Однако так как существующая понятийная база по оценке адекватности тренажёров не позволяет её представить в виде индикатора сопутствующего признака неадекватности применения тренажёров, то первостепенной задачей является определение её количественной формы, которая позволила бы устранить несоответствие оценок обученности [3, 4].

Согласно курсу учебно-лётной подготовки (КУЛП) оценка подготовленности курсантов осуществляется по четырёхбалльной системе (табл. 1). Для прогнозирования реальной эффективности выполнения учебно-боевых задач оценка коэффициентов качества подготовленности лётного состава к применению летательных аппаратов и его систем может проводиться лишь по результирующим оценкам "отлично", "хорошо", "удовлетворительно", "неудовлетворительно", зарегистрированным в учётно-отчётной документации (ведомости, зачётные книжки). Поэтому коэффициенты качества подготов-

ленности курсантов имеют вероятностный характер и могут оказаться завышенными, что может привести к завышенным оценкам эффективности выполнения учебно-боевых задач. Для устранения негативных последствий в определении качества подготовленности курсантов предлагается ввести фиксированные вероятностные уровни обученности (табл. 1).

Рассмотрим некоторые положения применительно к оценке вероятностных уровней подготовленности курсантов.

Курсант, приступивший к обучению, имеет определённый начальный уровень обученности ω_0 . Этот показатель можно трактовать так, что курсант выполнит то или иное упражнение, не приступая к обучению, как минимум с вероятностью ω_0 . Известно, что курсанты лётных специальностей обладают различной степенью восприятия практических навыков. Однако существует такой минимально необходимый уровень восприятия, при котором курсант за отведённые нормы тренировок по применению ЛА достигает требуемого уровня.

Таблица 1

i	Оценка качества обученности			Вероятностная оценка уровня обученности ω_i	Максимальная ошибка уровня обученности $\Delta\omega_i$
	результирующая	промежуточная	относительная		
1	неудов. (2)	$k_{\bar{n}\bar{d}} < 3$	$K < 0,6$	–	0,6
2	удовл. (3)	$k_{\bar{n}\bar{d}} > 3$	$0,6 \leq K < 0,72$	0,6	0,12
3	хорошо (4)	$k_{\bar{n}\bar{d}} > 3,6$	$0,72 \leq K < 0,92$	0,72	0,2
4	отлично (5)	$k_{\bar{n}\bar{d}} > 4,6$	$0,92 \leq K \leq 1$	0,92	0,08

Обозначим через $\xi = \xi_{\min}$ минимальную долю навыков, которые усваиваются курсантами за очередной тренаж на реальной технике, от общего объёма навыков.

С учётом вышеизложенного, получим:

$$\omega(N) = 1 - (1 - \omega_0)(1 - \xi)^N. \quad (1)$$

Известно, что после прекращения отработки навыков (тренажей) со временем происходит их уменьшение. Поэтому это соотношение можно представить в виде

$$\omega_t = \omega_k \cdot \exp(-0.23t), \quad t = 1, 2, \dots, m \text{ [годы]}, \quad (2)$$

ω_t и ω_k – соответственно текущий и конечный уровни обученности.

Если в соотношении (2) за ω_k принять начальный уровень подготовки ω_{n0} , соответствующий уровню подготовки курсанта в начале учебного года, а за время t принять время, равное одному году, то получим

$$\omega_0 = \omega_{n0} \cdot \exp(-0.23). \tag{3}$$

Соотношение (3) показывает, насколько изменится вероятность того, что курсант выполнит ту или иную задачу, не приступая к обучению в течение года.

Можно получить формулу для определения числа тренировок на реальной технике, проведение которых позволит достичь заданного уровня подготовленности ω_d :

$$N = \frac{\ln(1 - \omega_d) - \ln(1 - \omega_0)}{\ln(1 - \xi)}. \tag{4}$$

Из формулы (4) вытекает, что при $\omega_d \rightarrow 1$, \Rightarrow , $N \rightarrow \infty$.

Действительно, если необходимо подготовить специалиста, то нужны постоянные, непрекращающиеся тренировки. Чем выше уровень навыков, тем медленнее происходит прирост их объема.

Каждая новая единица навыков обходится дороже предыдущей.

Из анализа табл. 1 видно, что вероятностные оценки обученности определяются с ошибкой неопределённости и не позволяют достаточно точно определить динамику роста навыков от числа занятий и, следовательно, производить корректировку процесса обучения.

Например, по итогам выполнения тестового упражнения перед началом обучения обучаемый получил "неудовлетворительно"; после 1...3 занятий оценка не изменилась; после 4 и 6 занятий получил "удовлетворительно"; после 7...10 занятий получил "хорошо". На основании этого, согласно табл. 1, схема роста навыков ω представлена на рис. 1.

При этом доля навыков ξ_0 , которые усваиваются курсантами за очередной тренаж от общего объема навыков, и которые подлежат усвоению на данном и последующих занятиях, может быть определена по моменту перехода от предыдущего $i-1$ к последующему i уровню обученности за $\Delta n = n_i - n_{i-1}$ тренажей, а именно:

$$\xi_0 = 1 - \frac{\ln(1 - \omega_i) - \ln(1 - \omega_{i-1})}{n_i - n_{i-1}}. \tag{5}$$

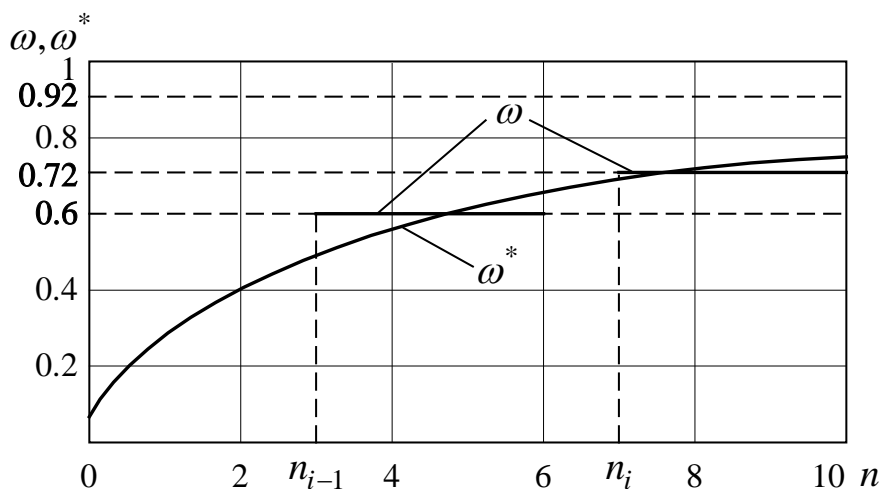


Рис. 1. Схема роста навыков

Если $\xi_0 < \xi = \xi_{\min}$, то, следовательно, необходимо производить корректировку процесса обучения оператора.

Соотношение (5) позволяет произвести лишь приблизительную оценку ξ_0 , так как для ω_i и ω_{i-1} характерны ошибки неопределённости $\Delta\omega_i$ и $\Delta\omega_{i-1}$ из-за конечности существующей балльной системы (так, например, оценке «неудовлетворительно» соответствует уровень 0,6, хотя реально он может принимать значения от 0 до 0,6).

Таким образом, ввиду того, что в настоящее время качество подготовки курсантов оценивается по четырёхбалльной системе, то определение значений ω_0 и ξ остаётся проблематичным. Точность определения вероятностных оценок уровня обученности курсантов лётных специальностей можно повысить, если пользоваться пятибалльной системой с использованием плюсов и минусов (12-балльная система). При этом вероятностная оценка уровня обученности может иметь вид, приведённый в табл. 2.

Таблица 2

i	Оценка качества обученности			Вероятностная оценка уровня обученности ω_i	Максимальная ошибка уровня обученности $\Delta\omega_i$
	результатирующая	промежуточная	относительная		
1	1	$k_{\bar{n}\bar{d}} < 1$	$K < 0,2$	–	0,2
2	2–	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 1$	$0,2 \leq K < 0,34$	0,2	0,14
3	2	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 1,7$	$0,34 \leq K < 0,4$	0,34	0,06
4	2+	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 2$	$0,4 \leq K < 0,46$	0,4	0,06
5	3–	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 2,3$	$0,46 \leq K < 0,54$	0,46	0,08
6	3	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 2,7$	$0,54 \leq K < 0,6$	0,54	0,06
7	3+	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 3$	$0,6 \leq K < 0,66$	0,6	0,06
8	4–	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 3,3$	$0,66 \leq K < 0,74$	0,66	0,08
9	4	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 3,7$	$0,74 \leq K < 0,8$	0,74	0,06
10	4+	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 4$	$0,8 \leq K < 0,86$	0,8	0,06
11	5–	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 4,3$	$0,86 \leq K < 0,94$	0,86	0,08
12	5	$k_{\bar{n}\bar{d}} \geq 4,7$	$0,94 \leq K \leq 1$	0,94	0,06

Из анализа табл. 2 следует, что 12-уровневая система оценки обученности позволяет определить уровень обученности в пределах от 0,2 до 1,0 с точностью, по сравнению с существующей четырёхбалльной системой, более чем в 2,5 раза. Соответственно предлагаемая балльная система оценки обученности курсантов позволяет в 2,5 раза точнее определить значения ω_0 и ξ .

Определив по 12-балльной системе значения ω_0 и соответственно по соотношению (5) ξ , можно оценить по выполнению условия $\xi_0 < \xi = \xi_{\min}$ правильность процесса обучения курсанта и, в случае необходимости, скорректировать методику его подготовки (дифференциальный подход) и количество тренажей, необходимых для достижения заданного уровня.

Ввиду ряда причин проведение тренировок на реальных ЛА остаётся проблематичным и поэтому уровень обученности курсантов снижается. В связи с этим предлагается использовать авиационные тренажёры. Однако так как использование данных систем с точки зрения устранения неадекватности их применения при планировании ТП из-за ограниченной адекватности тренажёров является новым и ещё неизученным направлением,

то необходимо провести дополнительные исследования по данному вопросу. При этом под адаптацией планирования ТП следует понимать способность к выявлению обеспечивающими органами учебно-лётной подготовки полезных содержательных компонентов учебных планов, направленных на устранение неадекватности применения авиационных тренажёров [5].

Библиографический список

1. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации. М: Машиностроение, 1982. 344 с.
2. Душков Б.А., Ломов Б.Ф. и др. Основы инженерной психологии. М.: Высшая Школа, 1987. 447 с.
3. Корчемный П.А. Психология лётного обучения. М.: Воениздат. 1986. 236 с.
4. Пономаренко В.А. Психология жизни и труда лётчика. М.: Воениздат. 1992. 224 с.
5. Годунов А.И., Мандриков В.И., Куатов Б.Ж. Оценка качества имитируемой модели в технических средствах подготовки и обучения авиационных специалистов // Тр. междунар. симпозиума «Надежность и качество», 2014. Т. 1. С. 296-300.

Информация об авторах

Куатов Бауржан Жолдыбаевич, заместитель начальника по учебной и научной работе, Военный институт Сил воздушной обороны им. Т.Я. Бегельдинова. E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru. Область научных интересов: организация и управление учебным процессом в военном вузе, подготовка авиационных специалистов.

Куртаев Сабит Жанболатович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sabit5@mail.ru. Область научных интересов: техническая эксплуатация авиационной техники.

ASSESSING SKILLS LEVEL OF FLYING CADETS

© 2014 B. Z. Kumatov¹, S. Z. Kurtaev²

¹Air Defense Forces Institute of the named after T. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

²Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper presents an analysis of works attempting verification of the adequacy of both simulation and simulators themselves. However, these attempts are limited to determining the fact of adequacy or inadequacy of the systems being checked, which cannot be used to identify the skills acquired when using them in accordance with the input generalized classification. The adequacy itself is a concomitant sign of inadequate use of simulators. However, since the established reference base for assessing the adequacy of simulators does not make it possible to present it in the form of the indicator of the concomitant sign of inadequacy of use of simulators, the

task of prime importance is to determine its quantitative form that would make it possible to eliminate the disparity of proficiency assessing. A system of assessing flying cadets' skills level is proposed in the paper. Some propositions concerning the assessment of probabilistic levels of cadets' proficiency are discussed. A five-mark grading system with pluses and minuses (12-mark system) for assessing the level of flying cadets' proficiency is proposed in the paper. The system allows increasing the accuracy of flight skills identifying.

Simulator training, flight simulators, cadet, aircraft.

References

1. Venda V.F. Inzhenernaya psikhologiya i sintez system otobrazheniya informatsii [Engineering psychology and information display design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 344 p.
2. Dushkov B.A., Lomov B.F. et. all. Osnovy inzhenernoi psikhologii [Engineering psychology foundations]. Moscow: Vischaya shkola Publ., 1987. 447 p.
3. Korchemniy P.A. Psikhologiya letnogo obucheniya [Flight training psychology]. Moscow: Voenizdat Publ., 1986. 236 p.
4. Ponomarenko V.A. Psikhologiya zhizni i truda letchika [Pilot's life and industrial psychology]. Moscow: Voenizdat Publ., 1992. 224 p.
5. Godunov A.I., Mandrikov V.I., Kumatov B.Zh. Evaluation of simulated model's quality in skills performance aids for airmen training // International symposium «Reliability and Quality». 2014. V. 1. P. 296-300. (In Russ.)

About the authors

Kumatov Baurzhan Zholdybaevich, Deputy Head for Academic and Research Activity, Air Defense Force Institute of the named after T. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan. E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru. Area of Research: organization and management of the educational process at a military higher school, training of aviation specialists.

Kurtaev Sabit Zhanbolatovich, post-graduate student of the Aircraft Maintenance Department, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: sabit5@mail.ru. Area of Research: aircraft maintenance diagnostics.

УДК 629.78.054

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЁТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2014 И. В. Фоминов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Рассматривается задача оценки метрологических характеристик маятникового акселерометра, изменяющихся под действием возмущающих факторов в полёте космического аппарата.

Разработан метод, позволяющий оценить значение коэффициента преобразования маятникового компенсационного акселерометра системы управления манёвром космического аппарата на основе применения графоаналитических и косвенных методов диагностики систем первого и второго порядка. Предложенный метод позволяет проводить автоматическую идентификацию коэффициента преобразования в условиях отсутствия внешних сил негравитационного происхождения. Сущность метода основывается на сигнальном воздействии на датчик силы акселерометра, вызывающем закономерное отклонение чувствительного элемента, и анализе переходной характеристики выходного сигнала акселерометра. Проведённые численные исследования показали, что точность оценки коэффициента преобразования в соответствии с предложенным методом зависит от трёх факторов: выходного измерительного шума, коэффициента затухания чувствительного элемента маятникового акселерометра, а также возникновения моментов внешних сил, действующих на ось чувствительности акселерометра в процессе идентификации. Результаты моделирования позволили сделать вывод о возможности применения данного метода в решении задачи самоконтроля характеристик маятникового акселерометра. Показано, что повышение точности оценки коэффициента преобразования возможно благодаря использованию статистических методов сглаживания и фильтрации.

Предварительный анализ показал, что предложенный метод может быть реализован при создании алгоритмического обеспечения системы самоконтроля интеллектуальных акселерометров.

Маятниковый акселерометр, коэффициент преобразования, идентификация, графоаналитический метод, косвенный метод.

Введение

Одной из приоритетных задач развития космической деятельности Российской Федерации до 2030 года является создание космических аппаратов (КА), способных выполнять свои функции в течение 10-15 лет. При этом ключевой проблемой для достижения этой цели является необходимость обеспечения стабильности метрологических характеристик измерительных устройств систем управления КА в течение длительного орбитального полёта. Дegradация измерительных средств под воздействием различных факторов космического пространства приводит к отклонению их параметров от номинальных (паспортизированных) значений [1,2], что в результате может привести к метрологическому отказу измерительного средства.

В этой связи возникает актуальная задача контроля метрологических характеристик измерительных средств в процессе орбитального полёта КА. Решение этой задачи обеспечит повышение показателей точности и уровня надёжности систем управления КА.

В настоящее время активно ведутся разработки средств контроля и диагностирования, встроенных в измерительные устройства систем навигации и определения ориентации КА, то есть разработки так называемых «интеллектуальных» датчиков [3, 4]. Важнейшим средством измерений в системах управления манёвром КА является акселерометр. Среди них широкое распространение приобретают маятниковые акселерометры (МА) компенсационного типа, создаваемые по интегральным технологиям [6].

Изменение параметров МА приводит к отклонению его коэффициента преобразования, который является одним из основных метрологических характеристик акселерометров. Это вызывает рост погрешности измерения кажущегося ускорения и, как следствие, рост погрешностей приращения скорости КА в режиме манёвра.

Определение коэффициента преобразования акселерометров, как правило, осуществляют в лабораторных условиях на специализированных стендах. В условиях же орбитального полёта такая задача является сложной как с научной, так и с технической стороны.

В статье предлагается косвенный метод идентификации коэффициента преобразования МА на основе известных графоаналитических методов идентификации параметров систем первого и второго порядка, изложенных в работе [5], а также методов диагностики, базирующихся на создании в цепи обратной связи

априорных диагностических сигналов $U_{\text{тест}}$.

Эти методы основаны на применении ступенчатого воздействия на систему и анализа переходных процессов выходного сигнала. Учитывая, что математическая модель маятникового акселерометра может быть приближённо описана системой второго порядка, можно сделать вывод о принципиальной возможности идентификации некоторых параметров встроенными аппаратно-программными средствами данного измерителя, в том числе идентификации коэффициента преобразования.

Постановка задачи

В качестве исходных данных примем математическую модель маятникового акселерометра компенсационного типа с ёмкостным датчиком перемещения (ДП) и магнитоэлектрическим датчиком момента (ДМ). Структурная схема МА с магнитоэлектрической обратной связью представлена на рис. 1 [6].

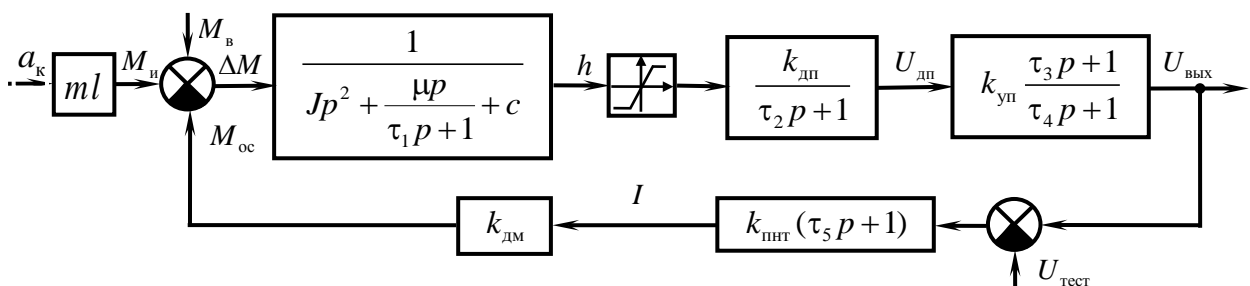


Рис. 1. Структурная схема МА с магнитоэлектрической обратной связью:

a_k – измеряемое кажущееся ускорение; ml – маятниковость чувствительного элемента (ЧЭ) МА; J – момент инерции ЧЭ МА; μ – коэффициент демпфирования ЧЭ; c – коэффициент жёсткости ЧЭ; h – линейное перемещение ЧЭ; l – длина ЧЭ (маятника); $k_{\text{дп}}$ – коэффициент передачи датчика перемещения; $k_{\text{уп}}$ – коэффициент передачи усилителя-преобразователя; $k_{\text{пнт}}$ – коэффициент преобразователя напряжения в ток; $k_{\text{дм}}$ – коэффициент передачи датчика момента; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$ – постоянные времени звеньев МА; $U_{\text{дп}}$ – сигнал датчика перемещения; M_n – момент инерции; M_b – возмущающий момент, $U_{\text{тест}}$ – тестовый сигнал; $M_{\text{ос}}$ – момент обратной связи; I – ток обратной связи

Передаточная функция МА по выходному сигналу имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{ml}{k_{\text{дм}}k_{\text{пнт}}} \times \frac{1}{\left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2Dp}{\omega_0(\tau_1 p + 1)} + \frac{c}{k_{\text{дм}}k_{\text{дп}}k_{\text{уп}}} \right) \cdot \frac{(\tau_2 p + 1) \cdot (\tau_4 p + 1)}{(\tau_3 p + 1)} + (\tau_5 p + 1)}, \quad (1)$$

где D – относительный коэффициент преобразования, $D = \frac{\mu}{2m\omega_0}$; ω_0 – соб-

ственная частота МА, $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$.

Тогда коэффициент преобразования МА определяется следующим выражением:

$$K_a = \frac{mlk_{\text{дп}}k_{\text{уп}}}{c + k_{\text{дм}}k_{\text{пнт}}k_{\text{дп}}k_{\text{уп}}}. \quad (2)$$

Требуется найти оценку коэффициента преобразования $\hat{K}(U_{\text{тест}}, P, h_{\text{max}}, t)$, где $P = \{ml, \mu, c, k_{\text{дп}}, k_{\text{дм}}, k_{\text{пнт}}, k_{\text{уп}}\}$ – множество параметров МА, подверженных различным возмущающим воздействиям; h_{max} – предельное значение отклонения маятника (подвижной пластины) акселерометра; $U_{\text{тест}}$ – пробный (тестовый) сигнал, воздействующий на чувствительный элемент МА.

Метод идентификации коэффициента преобразования маятникового акселерометра

В соответствии с поставленной задачей для идентификации коэффициента преобразования МА, функционирующего в режиме орбитального полёта, целесообразно использовать как известные графоаналитические методы идентификации параметров систем первого и второго порядка, так и косвенные методы диагностики. Графоаналитические методы идентификации параметров изложены в работе [5]. Они основаны на оценке параметров разомкнутой системы по виду выходной переходной характеристики. Косвенные

методы диагностики базируются, как известно, на создании в цепи обратной связи априорных тестовых сигналов $U_{\text{тест}}$.

Учитывая, что математическая модель маятникового акселерометра может быть приближённо представлена апериодической или колебательной системой, можно сделать вывод о принципиальной возможности идентификации некоторых параметров встроенными аппаратно-программными средствами данного измерителя, в том числе коэффициента преобразования.

В качестве допущений примем, что постоянные времени составных элементов МА $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$ равны нулю, а тестовое воздействие стабильно: $U_{\text{тест}}(t) = \text{const}$.

Тогда, в соответствии с графоаналитическим методом идентификации разомкнутых колебательных систем второго порядка, запишем передаточную функцию МА по тестовому воздействию $W_{U_{\text{изв}}}^{U_{\text{вых}}}(p)$ в виде

$$W_{U_{\text{тест}}}^{U_{\text{вых}}}(p) = \frac{K_{\text{тест}}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

где T – постоянная времени; ξ – коэффициент относительного демпфирования; $K_{\text{тест}}$ – коэффициент преобразования по тестовому воздействию $U_{\text{тест}}$.

При этом постоянная времени и коэффициент относительного демпфирования рассчитываются по формулам:

$$T = \sqrt{\frac{J}{c + k_{\text{пнт}}k_{\text{дм}}k_{\text{дп}}k_{\text{уп}}}}; \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{1}{J(c + k_{\text{пнт}}k_{\text{дм}}k_{\text{дп}}k_{\text{уп}})}}.$$

С учётом выражения (2) можно получить формулу для приближённого определения коэффициента преобразования МА:

$$\hat{K}_a \approx \gamma T^2 k_{дп} k_{уп}, \quad (4)$$

где γ – коэффициент, характеризующий конструктивные характеристики маятника (форму, массу и габариты). Для модели (1) справедливо равенство $\gamma = 3/4$.

Анализ выражения (4) показывает, что для идентификации коэффициента преобразования \hat{K}_a достаточно экспериментально определить значение постоянной времени T , а также произведение ко-

эффициентов $k_{дп} k_{уп}$. Для этого необходимо произвести следующие операции.

1. Для определения значения постоянной времени T требуется:

- построить экспериментальную переходную характеристику маятникового акселерометра, например, путём создания тестового воздействия в виде постоянного напряжения $U_{тест}$ на вход дополнительной обмотки датчика момента МА;

- определить моменты времени t_1 и t_2 перехода через линию установившегося значения выходного сигнала $U_{уст}$ (рис. 2);

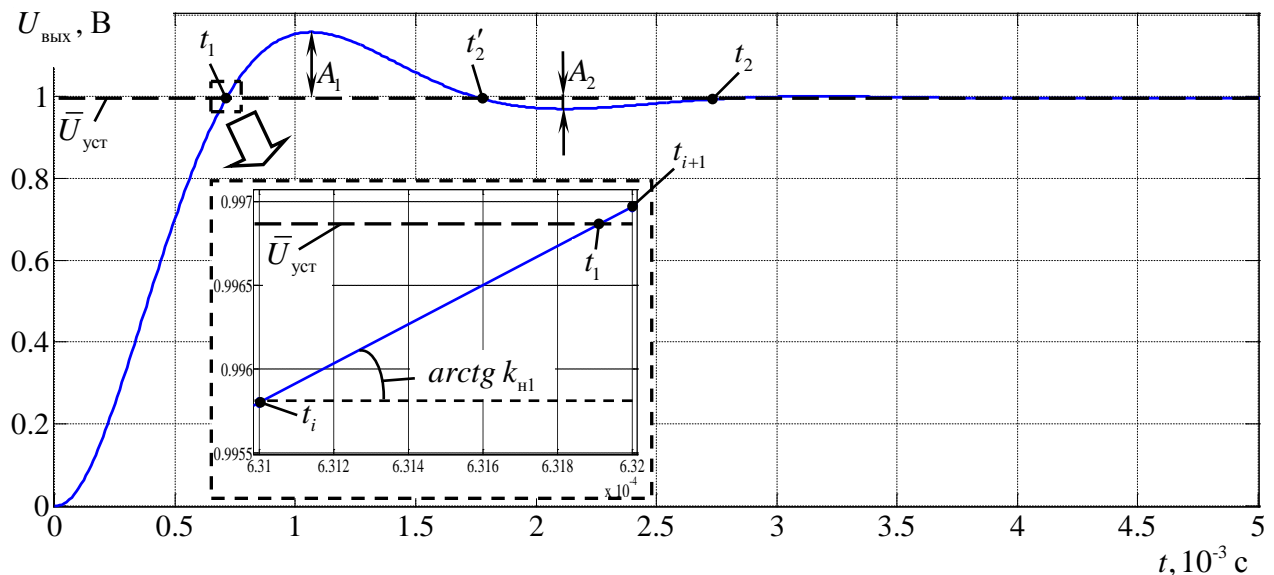


Рис. 2. Вид переходной характеристики маятникового акселерометра

- вычислить частоту собственных колебаний ЧЭ:

$$\omega = \frac{\pi}{t_2 - t_1};$$

- определить значения амплитуд A_1 и A_2 на интервале времени переходной характеристики от t_1 до t_2 ;

- вычислить коэффициент затухания

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\ln^2(A_1 / A_2)}}};$$

- вычислить постоянную времени в соответствии с известной формулой для колебательной системы второго порядка:

$$T = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\omega}.$$

2. Для определения произведения значений параметров $k_{дп} k_{уп}$ требуется:

- подать тестовые сигналы $\pm U_{тест}$ в цепь обратной связи МА таких величин, при которых угловое положение ЧЭ достигает соответствующих предельных значений h_{max}^+ и h_{max}^- ;

- произвести расчёт произведения параметров $k_{дп} k_y$ по формуле

$$k_{дп} k_y = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{тест}^+}{h_{max}^+} - \frac{U_{тест}^-}{h_{max}^-} \right).$$

Для подтверждения эффективности изложенного метода было проведено математическое моделирование процесса функционирования МА в режиме идентификации коэффициента преобразования. В качестве исходных данных для моделирования были выбраны следующие параметры МА [7]:

$$\begin{aligned} m &= 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ кг}; & l &= 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ J &= 7,09 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; & \mu &= 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \\ c &= 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}; & h_{max} &= 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ k_{дп} &= 2,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}; & k_{уп} &= 8,5; \\ k_{дм} &= 9,23 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м/В}; & U_{тест} &= 1 \text{ В}. \end{aligned}$$

Моделирование было проведено при допущении постоянства момента возмущающих сил $M_b = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$, действующих на ЧЭ, а также при условии отсутствия кажущегося ускорения $a_k = 0$.

Такие условия могут быть обеспечены при движении КА в режиме пассивного орбитального полёта. При этом для высоты полёта 300 км кажущееся ускорение, воздействующее на ЧЭ МА, не превышает значения порядка $10^{-6} g$.

Результаты моделирования подтвердили принципиальную возможность идентификации коэффициента преобразова-

ния. Установлено, что относительная погрешность оценивания коэффициента преобразования

$$\delta K_a = \frac{\hat{K}_a - K_a}{\hat{K}_a} \cdot 100\%$$

для принятых исходных данных составила $\delta K_a = 0,141\%$.

Проведённые исследования показывают, что погрешность определения фактического коэффициента преобразования в соответствии с предложенным методом зависит от трёх факторов:

- 1) случайной погрешности измерения, обусловленной внутренними шумами блока электроники МА;
- 2) коэффициента затухания, определяющего возможность представления физической модели МА колебательным звеном второго порядка;
- 3) допущения о постоянстве момента внешних сил в процессе идентификации.

Для оценки влияния первого и второго фактора на точность оценки коэффициента преобразования МА было проведено математическое моделирование процесса функционирования МА в режиме диагностики при различных значениях относительного коэффициента затухания ξ_{zc} и среднеквадратического отклонения погрешностей измерений σ . Результаты моделирования представлены на рис 3.

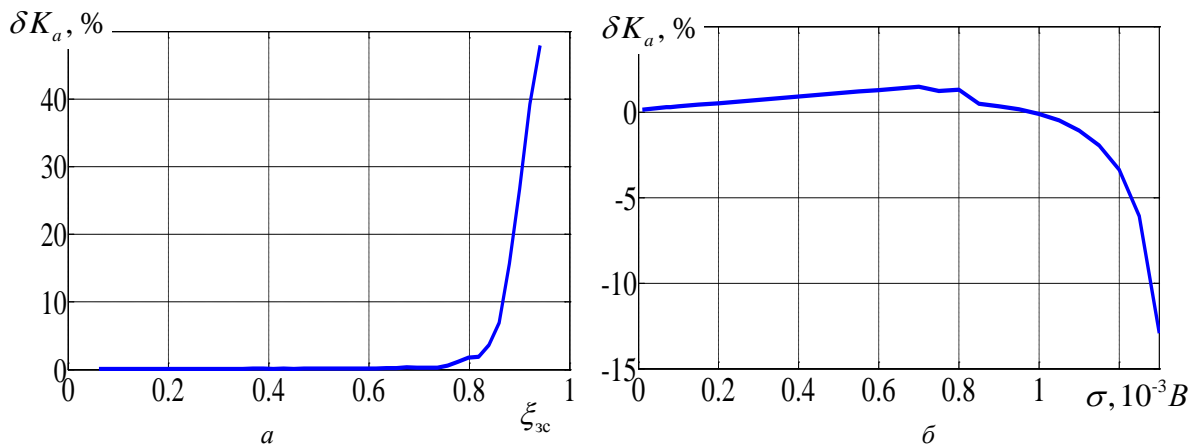


Рис. 3. Зависимости δK_a от коэффициента затухания ξ_{zc} и среднеквадратического отклонения случайной погрешности измерений σ

Из рис. 3, а видно, что относительная погрешность определения коэффициента преобразования существенно увеличивается при стремлении относительного коэффициента затухания ξ к единице. Это связано с тем, что при малых значениях ξ кривая переходного процесса пересекает линию установившегося значения под большим углом $\psi = \arctg k_{н1}$ (рис. 2), и это позволяет повысить отношение сигнал/шум при вычислении моментов времени t_1 и t_2 .

Результаты исследования влияния помехи на точность определения коэффициента преобразования подтверждают данный тезис. С увеличением уровня помехи значительно сложнее оценить характер переходного процесса, что влияет на качественную оценку коэффициента преобразования маятникового акселерометра (рис. 3, б).

Выводы

Одним из способов решения задачи контроля метрологических характеристик маятникового акселерометра в процессе орбитального полёта КА является рассмотренный метод идентификации коэффициента преобразования, который основан на применении графоаналитических методов для разомкнутых систем первого и второго порядков, а также косвенных методов диагностики инерциальных измерительных средств. Применение этого метода позволяет обеспечить контроль основной метрологической характеристики компенсационного акселерометра в режиме орбитального полёта космического аппарата и, как следствие, повысить эффективность решаемых им задач.

Библиографический список

1. Фоминов И.В. Обобщённая структура адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 5–9.
2. Голяков А.Д., Фоминов И.В. Анализ влияния надёжности и стойкости адаптивных информационно-измерительных навигационных систем на эффективность их использования // Навигация и гидрография. 2013. № 36. С. 9-16.
3. ГОСТ Р 8.734-2011. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. М.: Стандартинформ, 2012. 24 с.
4. Пронин А.Н. и др. Интеллектуализация средств измерений как фактор увеличения надёжности систем управления // Сб. тр. конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 106-117.
5. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. М.: МО СССР, 1987. 521 с.
6. Мокров Е.А., Папко А.А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники. Пенза: ПАИИ, 2004. 164 с.
7. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

Информация об авторе

Фоминов Иван Вячеславович, кандидат технических наук, докторант кафедры автономных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можай-

ского. E-mail: i.v.fominov@gmail.com. Область научных интересов: системы навигации и управления движением космических аппаратов.

IDENTIFICATION OF SCALE FACTOR OF A PENDULUM COMPENSATING ACCELEROMETER DURING AN ORBITAL SPACECRAFT MISSION

© 2014 I. V. Fominov

Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper deals with a crucial task of estimating the metrological characteristics of a pendulum accelerometer which change under the influence of perturbations in the flight of spacecraft.

A method is developed that makes it possible to estimate the value of the scale factor of a compensating pendulum accelerometer in the system of spacecraft maneuver control through the use of grapho-analytical and indirect methods of diagnosing first and second order systems. The proposed method makes possible automatic identification of the scale factor in the absence of external forces of non-gravitational origin. The essence of the method is based on the signal-extracting impact on the actuator accelerometer which causes a natural deviation of the sensing element, and the analysis of the transient response of the accelerometer output signal. Numerical studies show that the accuracy of estimating the scale factor in accordance with the proposed method depends on three factors: the output of the measuring noise, the attenuation coefficient of the pendulum accelerometer sensor, and the moments of the external forces acting on the sensitive axis of the accelerometer in the identification process. The results of simulation led to the conclusion about the possibility of applying this method in solving the problem of self-control of the characteristics of a pendulum accelerometer. It is shown that an increase in the accuracy of estimating the scale factor is possible due to the use of statistical methods of smoothing and filtering.

Preliminary analysis showed that the proposed method can be implemented in the creation of algorithmic software of the self-control system of smart accelerometers.

Pendulum accelerometer, scale factor identification, grapho-analytical method, indirect method.

References

1. Fominov I.V. Generalized structure of adaptive information and measuring complex of mobile object // *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2013. V. 56, no. 7. P. 5-9. (In Russ.)
2. Golyakov A.D., Fominov I.V. Analysis of the impact of reliability and stability of adaptive information-measuring navigation systems on the efficiency of their use // *Navigation and Hydrography*. 2013. No. 36. P. 9-16. (In Russ.)
3. GOST 8.734-2011. Intelligent sensors and measuring intelligent systems. Methods of metrological self control. Moscow: Standartinform Publ., 2012. 24 p. (In Russ.)
4. Pronin A.N. Intellectualization of measuring tools as a factor in increasing the reliability of control systems // *Sbornik trudov konferentsii «Upravlenie v morskikh i aérokosmicheskikh sistemakh» (UMAS-2014)*. SPb: Electropribor Publ., 2014. P. 106-117. (In Russ.)
5. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika [Identification and technical diagnosis]. Moscow: MO USSR Publ., 1987. 521 p.
6. Mokrov E.A., Papko A.A. Statikodinamicheskie akselerometry dlya raketno-kosmicheskoy tekhniki [Staticodynamic accelerometers for space-rocketry engineering]. Penza: PAII Publ., 2004. 164 p.
7. Raspolov V.Y. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.

About the author

Fominov Ivan Vyacheslavovich, Candidate of Science (Engineering), doctoral student in autonomous control systems, Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy,

St. Petersburg, Russian Federation. E-mail: i.v.fominov@gmail.com. Area of Research: navigation and control of spacecraft motion.

УДК 621.431.75

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОДАТЛИВОСТИ «БЕЛИЧЬЕГО КОЛЕСА» В ОПОРАХ РОТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 С. А. Дегтярев¹, М. К. Леонтьев², В. В. Попов³¹Научно-технический центр по роторной динамике
ООО «Альфа-Транзит», г. Химки²Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Приводится методика определения матрицы податливости упругой втулки типа «беличье колесо» с прямыми стержнями. «Беличье колесо» широко применяется в упруго-демпферных опорах авиационных газотурбинных двигателей. Определение матрицы податливости необходимо для построения точных моделей авиационных газотурбинных двигателей при решении задач роторной динамики. Методика построена на основе методов сопротивления материалов, позволяющих аналитическим путем получать компоненты матрицы. Результаты, полученные с помощью разработанной методики, сравниваются с результатами расчёта в конечно-элементном комплексе, а также с данными, полученными в других работах.

Упруго-демпферные опоры, «беличье колесо», матрица податливости, роторная динамика.

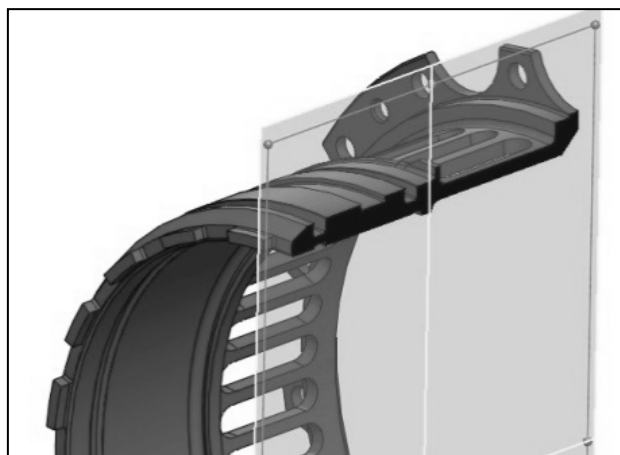
Введение

В конструкции авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) получили широкое применение упруго-демпферные опоры (УДО), имеющие в своём составе упругие элементы типа «беличье колесо» [1]. Они используются для частотной отстройки двигателя от нежелательных резонансных частот, а также разгрузки гидродинамических демпферов от веса роторов. Конструкции «беличьих колёс» достаточно разнообразны, некоторые из них показаны на рис. 1.

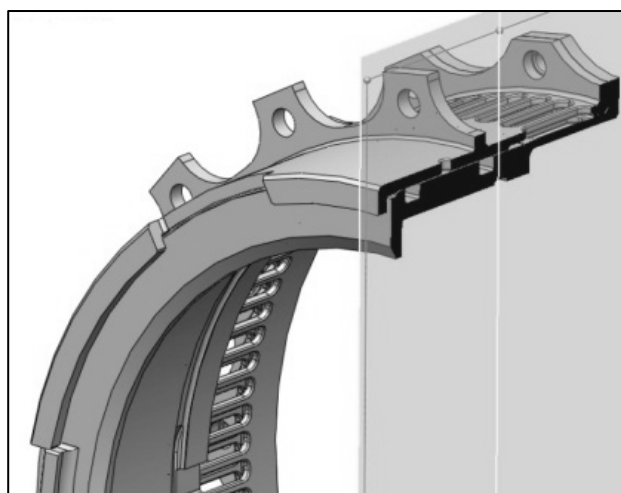
При наличии в опоре подшипника «беличьего колеса» суммарная податливость всех его упругих элементов (стержней) является определяющей в податливости всего опорного узла. Учёт других элементов опор роторов – подшипников,

корпусов – даёт уточнение результата расчёта суммарной податливости опор от 5 до 20 %.

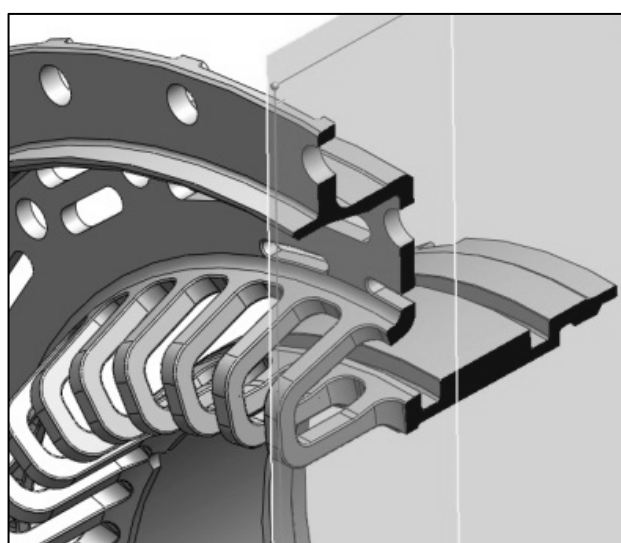
Податливость стержней «беличьего колеса» зависит от их конструкции, геометрии поперечного сечения, материала, температурных факторов и некоторых других. В работах [2] и [3] приводятся достаточно простые формулы для определения радиального коэффициента жёсткости упругой части «беличьего колеса» с прямыми стержнями прямоугольного сечения (рис. 1, а). Впоследствии формула из работы [2] была уточнена поправочным коэффициентом. В работе [4] приводится формула для определения радиальной жёсткости через поправочный коэффициент, учитывающий радиус скругления пазов.



а



б



в

Рис.1. Конструкции «белчиных колёс»: а - с прямыми стержнями, б - с составными стержнями, в - с криволинейными стержнями

Однако «беличье колесо» передаёт не только радиальные, но и осевые силы, а также моменты. Поэтому жёсткостные свойства «беличьего колеса» описываются в виде матрицы жёсткости или обратной от этой матрицы – матрицы податливости. Матрицы жёсткости и податливости являются главными компонентами уравнений динамики в задачах роторной динамики.

Распространённым способом определения коэффициентов матрицы податливости «беличьего колеса» является применение метода конечных элементов. Способ достаточно трудоёмкий с учётом того, что полная матрица податливости имеет размерность 6×6 и требует наличия трёхмерной модели. Однако для более простых конструкций с прямыми стержнями задача может быть решена более простым способом и с большой точностью.

В настоящей статье приведена методика получения основных коэффициентов матрицы податливости для таких конструкций. Для их получения используются обычные методы сопротивления материалов.

Определение компонент матрицы податливости «беличьего колеса»

Будем рассматривать модель «беличьего колеса» в виде консольной балки. Матрица податливости с основными коэффициентами δ_{ij} , необходимыми для описания упругих свойств беличьего колеса, имеет вид

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{xx} & 0 & 0 & 0 & \delta_{x\varphi} & 0 \\ 0 & \delta_{yy} & 0 & \delta_{y\vartheta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{\vartheta y} & 0 & \delta_{\vartheta\vartheta} & 0 & 0 \\ \delta_{\varphi x} & 0 & 0 & 0 & \delta_{\varphi\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{\psi\psi} \end{bmatrix}.$$

Для получения коэффициентов податливости на конце консольной балки по направлениям j последовательно прикладываются единичные силы и моменты и определяются по направлениям i соответствующие линейные и угловые перемещения.

δ_{xx} и δ_{yy} – компоненты матрицы податливости, связанные с действием поперечной силы по оси X и Y соответственно. В сечении упругой части «беличьего колеса» поперечная сила будет равномерно распределяться между каждым стержневым элементом (рис. 2).

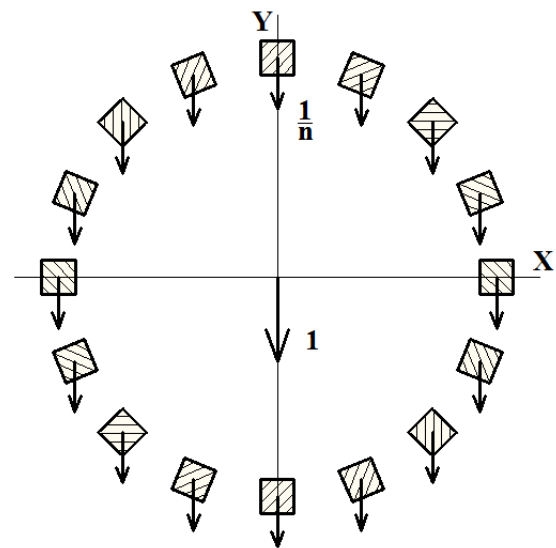


Рис. 2. Действие единичной поперечной силы в сечении равномерно распределяется на n стержней

Так как поворот сечения, где прикладывается нагрузка, в реальных конструкциях ограничивается достаточно жёсткими фланцами, то для каждого стержневого элемента запрещаются повороты на его конце. В общем случае направление действия поперечной силы не совпадает с главными осями стержневых элементов. Также отметим, что стержневые элементы являются короткими балками, поэтому в них необходимо учитывать деформации сдвига.

Определим перемещение вдоль оси Y одного стержневого элемента от действия единичной силы. Из [5] известно решение для данной задачи:

$$\delta_i = \frac{l^3}{12EJ_{xc}} + k_A \frac{l}{GA},$$

где l – длина стержневого элемента; E – модуль Юнга 1-го рода; G – модуль Юнга 2-го рода; A – площадь поперечного сечения; k_A – коэффициент, зависящий от геометрии поперечного сечения; J_{xc} – момент инерции относительно оси X стержневого элемента.

Оси X_c и Y_c стержневого элемента не совпадают с главными центральными осями u и v (рис.3).

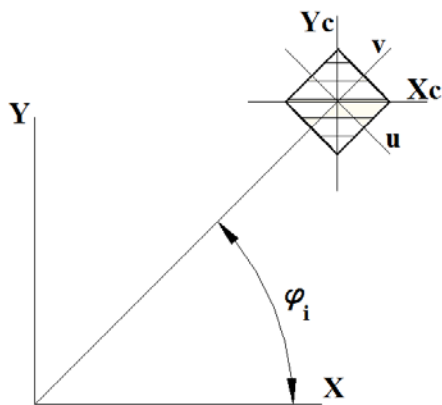


Рис. 3. Системы координат стержневых элементов

В этом случае момент инерции определяется как

$$J_{xc} = J_u \sin^2 \varphi_i + J_v \cos^2 \varphi_i,$$

где φ_i – угол расположения стержневого элемента (отсчитывается от оси X).

С учётом того, что каждый стержень увеличивает общую жёсткость консольной балки, будем иметь:

$$\delta_{yy} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta_i}},$$

где n – число стержневых элементов в «беличьем колесе».

Аналогично выражается формула для получения δ_{xx} .

δ_{zz} – компонент матрицы податливости, связанная с действием осевой силы по оси Z . В сечении «беличьего колеса» осевая сила будет равномерно распределяться между каждым стержневым элементом и вызывать в них напряжения растяжения или сжатия. В итоге компонент матрицы податливости получается равным

$$\delta_{zz} = \frac{l}{nEA}.$$

$\delta_{\varphi\varphi}$ и $\delta_{\varphi\theta}$ – компоненты матрицы податливости, связанные с действием изгибающего момента вокруг оси X и Y соответственно. Момент инерции всего сечения относительно главной центральной оси определяется через теорему Штейнера [3]

$$J_x = \sum_i J_{ci} + y_i^2 A_i,$$

где J_x – главный центральный момент инерции относительно оси X ; J_{ci} – момент инерции i -го упругого стержня; y_i – расстояние от центра тяжести до оси X для i -го упругого стержня; A_i – площадь поперечного сечения i -го упругого стержня. Чаще всего справедливо утверждение, что $J_{ci} \ll y_i^2 A_i$, поэтому момент инерции можно определить как

$$J_x \approx \sum_i y_i^2 A_i.$$

Определим податливость стержня от действия единичного изгибающего момента как величину поворота вокруг оси X от действия единичного изгибающего момента. Для данной задачи имеется следующее решение:

$$\delta_{\varphi\varphi} = \frac{l}{EJ_y}.$$

По аналогии для $\delta_{g,g}$ получается выражение

$$\delta_{\varphi\varphi} = \frac{l}{EJ_x}$$

$\delta_{x\varphi}$ и $\delta_{y\varphi}$ – перекрёстные коэффициенты матрицы, которые можно определить через линейное перемещение сечения стержня от действия единичного изгибающего момента

$$\delta_{x\varphi} = \frac{l^2}{2EJ_y} \text{ и } \delta_{y\varphi} = -\frac{l^2}{2EJ_x}$$

$\delta_{\psi\psi}$ – коэффициент матрицы податливости, связанный с действием крутящего момента вокруг оси Z.

Действие крутящего момента можно представить как действие поперечных сил на стержневые элементы (рис.4).

Стержневые элементы изгибаются по одной из главных осей и их повороты на концах также ограничены жёсткими фланцами. Перемещение каждого элемента за счёт действия единичной силы равно

$$\delta = \frac{l^3}{12RnEJ_v} + k_A \frac{l}{RnGA}$$

Поворот сечения в целом за счёт действия единичного крутящего момента равен

$$\delta_{\psi\psi} = \frac{1}{R} \left(\frac{l^3}{12RnEJ_v} + k_A \frac{l}{RnGA} \right)$$

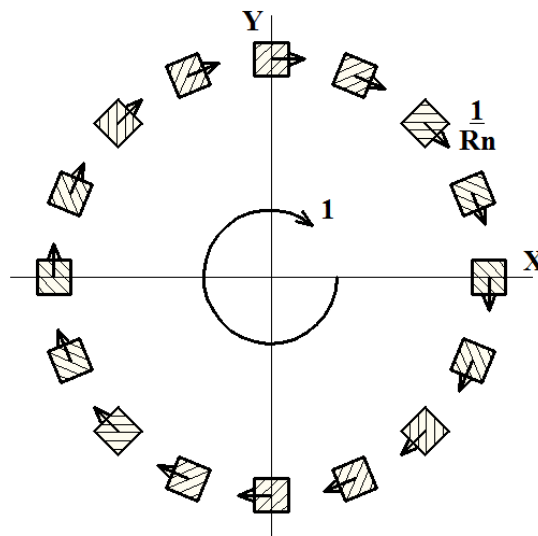


Рис. 4. Действие единичного крутящего момента в сечении представляется в виде действия на стержни поперечных сил, отнесённых к радиусу расположения стержней R и их количеству n

В качестве примера приведём расчёт матрицы податливости для «беличьего колеса» с параметрами, представленными в табл. 1.

Для проверки результатов также проводился расчёт в конечно-элементном комплексе. Конечно-элементная модель «беличьего колеса» представлена на рис. 5.

Таблица 1. Характеристики «беличьего колеса»

Обозначение	Описание	Величина	Размерность
R	Радиус расположения стержневых элементов в УДО	80	мм
l	Длина стержневых элементов	31	мм
b	Ширина стержневых элементов	5	мм
h	Высота стержневых элементов	4	мм
n	Количество стержневых элементов	42	–
E	Модуль Юнга 1-го рода	$2 \cdot 10^5$	МПа
μ	Коэффициент Пуассона	0,3	–

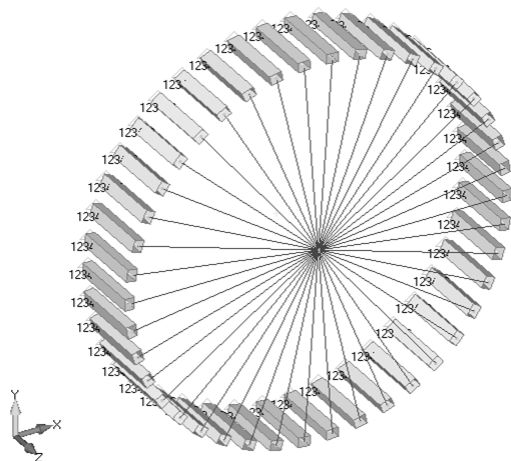


Рис. 5. КЭ модель «беличьего колеса»

Стержни смоделированы балочными элементами. С одной стороны они жёстко закреплены по всем степеням свободы, а с другой связаны между собой абсолютно жёстким элементом и сведены к центральному узлу. Нагрузка модели производится через центральный узел. Результаты расчёта компонентов матрицы податливости по выведенным формулам и полученным в конечно-элементном комплексе представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчётов

Компонента матрицы податливости	Решение по приведённой методике	Решение с помощью метода конечных элементов	Погрешность, %
δ_{xx}	$9,239 \cdot 10^{-6}$	$9,254 \cdot 10^{-6}$	0,16
$\delta_{x\varphi}$	$8,9379 \cdot 10^{-10}$	$8,9331 \cdot 10^{-10}$	0,05
δ_{yy}	$9,239 \cdot 10^{-6}$	$9,254 \cdot 10^{-6}$	0,16
$\delta_{y\vartheta}$	$-8,9379 \cdot 10^{-10}$	$-8,9331 \cdot 10^{-10}$	0,05
δ_{zz}	$1,8452 \cdot 10^{-7}$	$1,845 \cdot 10^{-7}$	0,01
$\delta_{\vartheta\vartheta}$	$5,7664 \cdot 10^{-11}$	$5,7633 \cdot 10^{-11}$	0,05
$\delta_{\varphi\varphi}$	$5,7664 \cdot 10^{-11}$	$5,7633 \cdot 10^{-11}$	0,05
$\delta_{\psi\psi}$	$1,1983 \cdot 10^{-9}$	$1,1883 \cdot 10^{-9}$	0,84

Погрешность компонентов матрицы податливости, полученных по приведённой методике, по сравнению с конечно-элементным расчётом составляет не более 1%.

В работах [2] и [3] имеются формулы для радиальных коэффициентов жёсткости:

$$k = \frac{nEab(a^2 + b^2)}{2l^3},$$

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{12E(J_u \sin^2 \varphi_i + J_v \cos^2 \varphi_i)}{l^3}.$$

Подсчитанные по этим формулам податливости (которые в данном случае соответствуют компоненте δ_{xx}) дают погрешность по сравнению с конечно-элементным расчётом 7,4%.

Заключение

В статье приведена методика для определения компонентов матрицы податливости «беличьего колеса» с прямыми стержнями. Методика строится на базе аналитических зависимостей методов сопротивления и позволяет с высокой точностью определять компоненты матрицы. Разница между результатами по приведённой методике и конечно-элементным расчётом для компонентов не превышает 1%. При этом время получения матрицы

податливости не превышает долей секунды. Данная методика и матрица податливости, получаемая с её помощью, могут использоваться для моделирования опорных узлов авиационных газотурбинных двигателей в задачах роторной динамики. Дальнейшим развитием методики может стать вывод формул для компонентов матриц податливости с учётом скруглений пазов в основании стержней, различных конфигураций стержней и т.д.

Библиографический список

1. Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов / под ред. А.И. Белоусова. Самара: СНЦ РАН, 2002. 335 с.

2. Сергеев С.И. Демпфирование механических колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 408 с.

3. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. д-ра техн. наук, проф. И. А. Биргера, д-ра техн. наук,

проф. Б. Ф. Шорра. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.

4. Балякин В.Б., Барманов И.С. Методика определения коэффициента жесткости упругих элементов опор роторов авиационных газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-1. С. 213-217.

5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2010. 590 с.

Информация об авторах

Дегтярев Сергей Александрович, руководитель направления разработки средств моделирования, Научно-технический центр по роторной динамике ООО «Альфа-Транзит». E-mail: degs@alfatran.com. Область научных интересов: роторная динамика, вибрационная диагностика.

Леонтьев Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкция и проектирование двигателей», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail:

lemk@alfatran.com. Область научных интересов: проектирование конструкций газотурбинных двигателей, прочность, роторная динамика, вибрационная диагностика.

Попов Валерий Васильевич, ассистент кафедры «Прикладная механика», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. E-mail: vypopov.bmstu@gmail.com. Область научных интересов: вычислительная механика, тензорная алгебра в механика, механика контактного взаимодействия.

“SQUIRREL CAGE” FLEXIBILITY IN SUPPORTS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINE ROTORS

© 2014 S. A. Degtiarev¹, M. K. Leontiev², V. V. Popov³

¹Scientific and Technical Center of Rotor Dynamics Alfa-Tranzit., Co.Ltd,
Khimky, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Elastic damper supports composed of elastic elements of “the squirrel cage” type are widely applicable in the design of aviation gas turbine engines. They are used for engine frequency detuning from unwanted resonance frequencies and for unloading of hydrodynamic dampers from the rotor weight. “Squirrel cage” elements are designed in different ways but the schemes with straight, compound and curvilinear rods are the most frequently used ones. Total flexibility of the rods that form “the squirrel cage” mainly determines the flexibility of the whole elastic-damper support in general. References [1] and [2] give simple equations to obtain radial stiffness coefficient of the elastic part of “the squirrel cage” with straight rods of the rectangular cross-section. However, “the squirrel cage” transmits not only radial forces but axial ones and moments as well. This fact necessitates consideration of other coefficients of the general flexibility matrix of “the squirrel cage”.

The present article presents a methodology of determining the flexibility matrix of an elastic bush of “the squirrel cage”. The given methodology is applicable for bushes with straight rods (finite-element methods should be used for compound and curvilinear rods). Flexibility matrix components are obtained using the methods of strength of materials. The elastic bush of “the squirrel cage” is considered as a set of straight short rods restricted by stiff flanges from the butts. As a result, an analytical equation depending on the bush characteristics was obtained for every matrix component. As a test example, a flexibility matrix for the defined characteristics was obtained. Meanwhile, the time of obtaining the flexibility matrix does not exceed fractions of a second. Similarly, a flexibility matrix was obtained using calculations in the finite-element complex. The difference between the results obtained was less than 1%. The given algorithm and the flexibility matrix obtained with its help may be used for the simulation of support units of aviation gas turbine engines in rotor dynamics tasks.

Elastic damper supports, “squirrel cage”, flexibility matrix, rotor dynamics.

References

1. Belousov A.I., Baljakin V.B., Novikov D.K. Teorija i proektirovanie gidrodinamicheskikh dempferov opor rotorov [Theory and design of hydrodynamic rotor support dampers]. Samara: SNTs RAN Publ., 2002. 335 p.
2. Sergeev S.I. Dempfirovanie mehanicheskikh kolebanij [Damping of mechanical vibrations]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959. 408 p.
3. Birger I.A., Shorr B.F. Dinamika aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej [Dynamics of aircraft gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 232 p.
4. Baljakin V.B., Barmanov I.S. Design procedure of factor of rigidity flexible elements of support of rotors aviation gas turbine engines // Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. V. 15, no. 4-1. P. 205-209. (In Russ.)
5. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow: Bauman Moscow St. Tech. Univ. Publ., 2010. 590 p.

About the authors

Degtiarev Sergey Alexandrovich, Function supervisor on the development of simulation tools, Scientific and Technical Center of Rotor Dynamics Alfa-Tranzit Co.Ltd, Khimky, Russian Federation. E-mail: degs@alfatran.com. Area of Research: rotor dynamics, vibration diagnostics.

Leontiev Mikhail Konstantinovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of Department 203 “Construction and Design of Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Rus-

sian Federation. E-mail: lemk@alfatran.com. Area of Research: structural design of gas turbine engines, durability, rotor dynamics, vibration diagnostics.

Popov Valery Vasilyevich, teaching assistant of the Department PK-5 “Applied Mechanics”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: vyvpopov.bmstu@gmail.com. Area of Research: computational mechanics, tensor algebra, mechanics of contact interaction.

УДК 620.91

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ВОДОВОЗДУШНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

© 2014 С. С. Достовалова¹, Р. А. Серебряков², С. Г. Батухтин³, А. Г. Батухтин³

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства, г. Москва

³Забайкальский государственный университет, г. Чита

В статье рассмотрена энергоэффективная схема использования энергии Солнца в системах централизованного теплоснабжения, позволяющая уменьшить капитальные затраты и эксплуатационные расходы и увеличить степень замещения традиционных источников теплоты. Универсальность систем с использованием данной схемы обуславливает широкую сферу их применения: от дома коттеджного типа до отопления промышленных помещений и тепличных комплексов. Сущность предлагаемой схемы заключается в том, что солнечный коллектор по нагреваемой среде подключают к воздуховоду, соединённому с отопляемым помещением, и антифризом, циркулирующим в контуре: бак – аккумулятор – солнечный коллектор. Предложен способ интенсификации теплообмена за счёт использования интенсификаторов луночного типа. Определена эффективность интенсификации посредством расчёта суточного тепловосприятия плоского воздушного коллектора с интенсификацией лунками и без, а также экономический эффект от внедрения предложенного способа. Согласно расчётам предложенная схема отопления и интенсификация теплообмена на поверхности входящего в неё коллектора может дать ощутимый экономический эффект при внедрении.

Солнечная энергия, тепловая энергия, интенсификация, воздушный коллектор, теплоснабжение.

Стратегической целью государственной энергетической политики в области формирования рационального топливно-энергетического баланса является оптимизация структуры производства, внутреннего потребления и экспорта топливно-энергетических ресурсов с учётом требований обеспечения энергетической безопасности, экономической и энергетической эффективности, усиления внешнеэкономических позиций страны. При этом на первом месте в её выполнении в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» определён рост значения возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетических потребностей общества. Без внедрения технологий, позволяющих вытеснить органическое топливо из топливного баланса страны, невозможно выполнение основных положений стратегии, предусматривающих максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для

устойчивого роста экономики и повышения качества жизни населения страны. Для большинства регионов РФ наиболее перспективным из возобновляемых источников энергии является энергия Солнца.

Схема теплоснабжения

В настоящее время разработано значительное количество различных схем использования энергии Солнца в системах горячего водоснабжения и водяного отопления. Отопление помещений тёплым воздухом на основе источников теплоты различных типов позволяет во многих случаях значительно уменьшить капитальные затраты и эксплуатационные расходы. Применение гелионагрева с использованием солнечных коллекторов различного типа в системах воздушного отопления позволит значительно повысить эффективность таких систем, а также увеличить степень замещения традиционных источников теплоты. В таких системах

нагревается, в зависимости от температурного режима, вода или воздух, либо осуществляется совместный нагрев воды для нужд горячего водоснабжения и воздух для отопления. Поскольку конечной задачей является нагрев воздуха в помещении, то именно такие комплексы позволяют достичь максимальной эффективности, исключив все промежуточные процессы и преобразования. В качестве источника тепла они могут использовать как тепло сгораемого топлива, так и тепло, получаемое солнечными коллекторами [1].

Универсальность систем обуславливает широкую сферу их применения: от дома коттеджного типа до отопления промышленных помещений и тепличных комплексов.

К преимуществам воздушного отопления можно отнести [2]:

1. Экономичность, поскольку тепло получается непосредственно в нагреваемом помещении.
2. Улучшение микроклимата поме-

щения, так как нагрев воздуха на 40-70 °С вполне достаточен для приточной вентиляции.

3. Малая инерционность, поскольку система воздушного отопления позволяет полностью прогреть помещение за 1,5-2 часа.

4. Отсутствие промежуточного теплоносителя, что позволяет отказаться от строительства водяного отопления. В зимнее время это исключает риск размораживания системы.

5. Высокая степень автоматизации позволяет вырабатывать тепло по потребности.

Большинство преимуществ данной схемы возможно только при использовании в солнечных коллекторах незамерзающих жидкостей. Нагрев воздуха можно производить как в промежуточном теплообменнике от жидкости, нагретой в коллекторе, так и непосредственно в нём. На рис. 1 представлена схема использования теплоты Солнца, позволяющая совмещать эти способы [3].

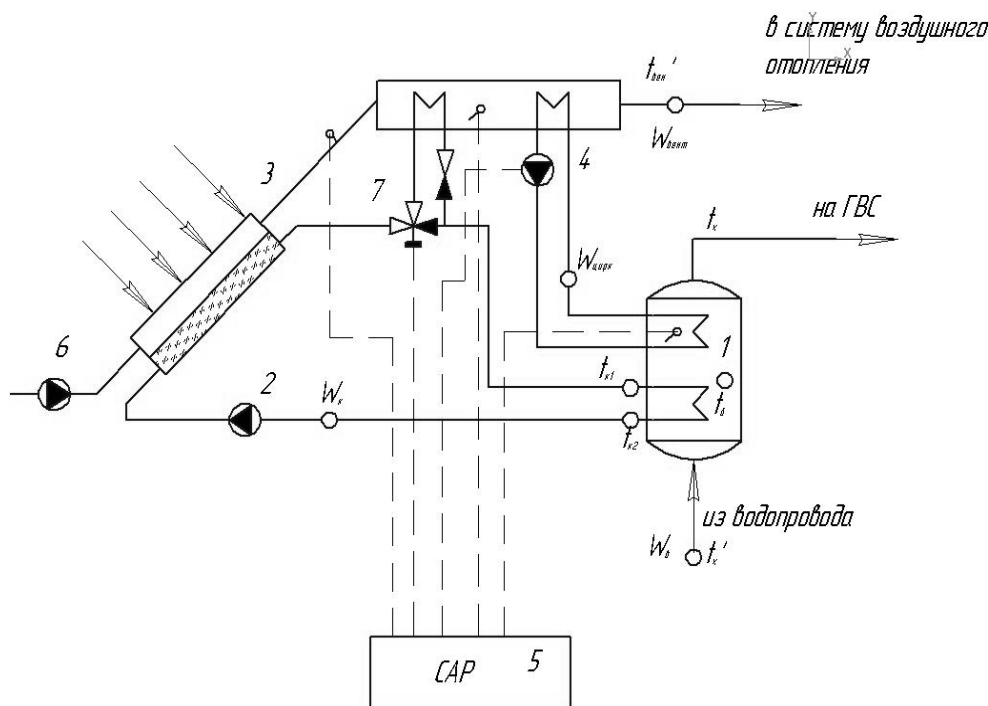


Рис. 1. Система гелиовоздушно-водяной системы отопления:

- 1 – бак-аккумулятор; 2 – насос гелиоконтур; 3 – гелиовоздушный солнечный коллектор;
4 – калорифер; 5 – система автоматического регулирования;
6 – вентилятор приточного воздуха; 7 – трёхходовой клапан гелиоконтур

Применение данной схемы позволяет использовать преимущества воздушных систем отопления при внедрении солнечных коллекторов комбинированного типа (с совместным нагревом воздуха и жидкого теплоносителя), а также снизить температуру лучевоспринимающей пластины и, как следствие, уменьшить потери с излучением.

Сущность предлагаемой схемы заключается в том, что солнечный коллектор по нагреваемой среде подключают к воздухопроводу, соединённому с отопляемым помещением и антифризом, циркулирующим в контуре: бак – аккумулятор – солнечный коллектор. Воздух посредством солнечной радиации и вынужденной конвекции при обтекании трубок и пластины подогревается, после подогрева направляется в воздухопровод и, пройдя его, направляется в систему воздушного отопления. Бак-аккумулятор по аккумулирующему теплоносителю подключён к холодному водопроводу и стороннему источнику теплоты, включённому через погружённую поверхность нагрева.

Эффективность коллектора (рис. 1) может быть в значительной мере повышена посредством интенсификации теплообмена на поверхностях с полусферическими углублениями за счёт увеличения площади теплообмена.

Ещё в 90-е годы прошлого века в работах Кикнадзе Г.И., Краснова Ю.К. и др. [4] изучался новый класс квазипотенциальных закрученных потоков газов и жидкостей, формирование которых достигается либо за счёт слияния специально направленных струй рабочей сплошной среды, либо при обтекании его трёхмерных «лунок» (так называемых «генераторов вихря») на энергообменных или несущих поверхностях.

Высокоэффективное практическое использование подобных потоков оказалось возможным благодаря широкомаштабным термодинамическим исследованиям и опытно-конструкторским работам. Так, согласно экспериментальным данным, вихревые струи, сформированные в соответствии с точными решениями урав-

нений гидродинамики, увеличивают вдвое расход газа или жидкости по сравнению с потоками иной структуры при равных напорах в магистралях одинаковых размеров и формы. Такие закрученные течения самоорганизуются в потоках теплоносителей, обтекающих энергообменные поверхности, сформированные специальными профилями «генераторов вихря» [4], существенно интенсифицируют тепло- и массообмен при снижающемся аэродинамическом сопротивлении энергообменных каналов.

Расчёт суточного тепловосприятия

Для определения эффективности интенсификации был проведен расчёт суточного тепловосприятия плоского водовоздушного коллектора с интенсификацией лунками и без них (с использованием программы определения оптимальных технико-экономических показателей работы ТЭС [5]).

Климатологические данные (г. Чита): долгота – 113 ч 23 мин, широта – 52 ч 6 мин.

Направление поверхности: угол наклона к горизонту – 45 град., азимутальное направление 180 град.

Пластина: размеры: 1000×100×10 мм, материал – медь, толщина стенки 2 мм.

Трубки: количество 10 шт., диаметр 25 мм, материал – медь, толщина стенки 1 мм, доля охвата 50%, материал термоинтерфейса – олово, толщина слоя 500 мкм.

Поглотитель: окраска – матовая чёрная краска (степень поглощения 95, чернота 5, селективность 0,4).

Внешняя изоляция: стекло – два слоя, толщина 1 мм, коэффициент ослабления 0.4 1/мм, размер прохода воздуха 30 мм.

Параметры воздуха: температура воздуха на входе 0 °С, расход воздуха – 1000 м³/ч.

При расчёте суточного тепловосприятия регенеративного водовоздушного теплообменника с повышенной эффективностью теплообмена полученные по

стандартной методике коэффициенты теплоотдачи повышаются пропорционально средним (по поверхности лунки) относительным коэффициентам теплоотдачи. Для учёта увеличения площади теплообмена необходимо оценить её относительное увеличение K_F и учесть её в стандартной методике.

Для предложенных геометрических параметров полусферических углублений K_F принимает значения от 1,09 до 1,116 в зависимости от плотности упаковки (для предварительной оценки в расчётах принимался $K_F = 1,1$). Проведённые расчёты показали, что, режим течения турбулентный: $Re=696364$. Для такого режима при интенсификации на сферических интенсификаторах принимаем (по рис. 2 [6]) $\bar{\alpha} = 1.25$.

Результаты расчёта суточного теплового восприятия плоского водовоздушного коллектора сведены в табл. 1.

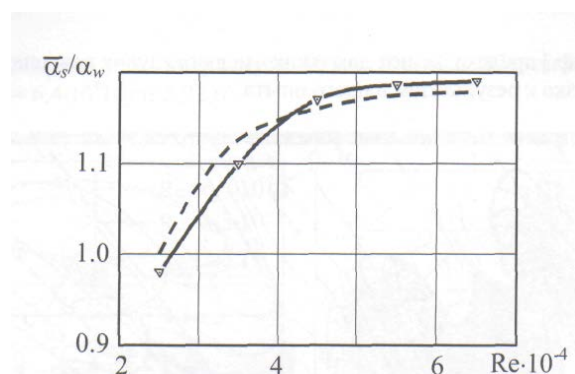


Рис. 2. Средние (по поверхности лунки) относительные коэффициенты теплоотдачи для сферической лунки

Таблица 1. Результаты расчёта плоского коллектора

№ п/п	Местное время	Тепло, полезно воспринятое коллектором (без интенсификации), Вт	Тепло, полезно воспринятое коллектором (интенсификация: $K_F = 1.1$, $\bar{\alpha} = 1.25$), Вт
	1	2	3
	9:00	0	0
1.	10:00	150	152
2.	11:00	362	377
3.	12:00	550	590
4.	13:00	625	635
5.	14:00	670	675
6.	15:00	655	660
7.	16:00	585	595
8.	17:00	455	465
9.	18:00	260	267
10.	19:00	50	52
11.	20:00	0	0
12.	Итого	4362	4468

Повышение эффективности за счёт интенсификации лунками составило 2,43%. Годовая эффективность, достигаемая за счёт интенсификации коллектора, составит 106 кВт/м².

При текущем тарифе на тепловую энергию в системе централизованного теплоснабжения г. Читы 1925 руб./Гкал экономический эффект составляет 175,5 руб./м².

Таким образом, предложенная схема гелиовоздушного отопления и интенсификация входящего в неё коллектора лун-

ками может дать ощутимый экономический эффект при внедрении.

Библиографический список

1. Батухтин А.Г., Батухтин С.Г. Методы повышения эффективности современной работы установок гелиоотопления и систем централизованного теплоснабжения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 48. С. 48-53.

2. Альтернатива котельным есть! Отопление теплым воздухом // Энергосбережение и проблемы энергетике Западного Урала. 2008. № 1-2. С. 18-22.

3. Батухтин А.Г., Батухтин С.Г. Солнечная установка и способ её работы. Патент РФ 2403511; опублик. 10.11.2010; бюл. № 31.

4. Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г.

Самоорганизация смерчеобразных вихревых структур в потоках газов и жидкостей и интенсификация тепло- и массообмена. Препринт № 227-90. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1990. 46 с.

5. Басс М.С., Батухтин А.Г., Батухтин С.Г. Программа определения оптимальных технико-экономических показателей работы ТЭС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009614238.

6. Сапожников С.З. Основы градиентной теплотметрии. СПб.: Политехнический ун-т, 2012. 203 с.

Информация об авторах

Достовалова Софья Сергеевна, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: so-phiadost@mail.ru. Область научных интересов: энергосбережение, криогеника, вихревой эффект.

Серебряков Рудольф Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, г. Москва. E-mail: ruds@list.ru. Область научных ин-

тересов: ветроэнергетика, энергосбережение, вихревой эффект.

Батухтин Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры тепловых электрических станций, Забайкальский государственный университет, г. Чита. Область научных интересов: теплоснабжение, энергосбережение, тепло- и массообмен.

Батухтин Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Забайкальский государственный университет, г. Чита. Область научных интересов: энергосбережение, тепло- и массообмен, возобновляемые источники энергии.

REGENERATIVE AIR-WATER HEAT EXCHANGER WITH IMPROVED HEAT EXCHANGE ABILITY

© 2014 S. S. Dostovalova¹, R. A. Serebryakov², S. G. Batukhtin³, A. G. Batukhtin³

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²VIESH (All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture), Moscow, Russian Federation

³Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

The article describes a power-efficient scheme for using solar energy in centralized heat supply systems that makes it possible to reduce capital and operating costs and increase the degree of substitution of traditional

sources of heat. The versatility of systems based on the scheme determines a wide range of their applications: from cottage-type houses to the heating of industrial facilities and greenhouses. The essence of the proposed scheme is that the solar collector for heating medium is switched to the air duct connected to the heated space and an antifreeze substance which circulates in the circuit: storage tank - solar collector. A method of intensifying heat transfer through the use of hole-type intensifiers is proposed. The intensification efficiency is determined by the calculation of daily heat absorption of a flat air collector with the intensification by using holes and without these, the economic effect of the introduction of the proposed method is also determined. According to the calculations, the proposed heating scheme and the intensification of heat transfer on the surface of the collector included in it can provide tangible economic benefits in the implementation.

Solar collector, heat, energy saving, intensification.

References

1. Batukhtin A.G., Batukhtin S.G. Modern methods of increasing the effectiveness of helium heating installations and centralized heat supply systems // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. 2009. № 48. P. 48-53. (In Russ.)
2. Alternative to boiler plants. Warm air heating // Energy saving and energy problems of the Western Urals. 2008. № 1-2. P.18-22. (In Russ.)
3. Batukhtin A.G., Batukhtin S.G. Solnechnaya ustanovka i sposob ee raboty [Solar installation and how it works]. Patent RF, no. 2403511, 2010. (Publ. 10.11.2010, bul. no. 31)
4. Kiknadze G.I., Oleynikov V.G. Samoorganizatsiya smercheobraznykh vikhrevykh struktur v potokakh gazov i zhidkostey i intensivatsiya teplo- i mas-sobmena [Self-organization of tornado-like vortex structures in flows of gases and liquids and intensification of heat and mass transfer]. Preprint № 227-90. Novosibirsk: Institut Teplofiziki SO AN SSSR Publ., 1990. 46 p.
5. Bass M.S., Batukhtin A.G., Batukhtin S.G. Programma opredeleniya optimal'nykh tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley raboty TES [The program of determining optimal technical and economic performance of thermal power stations]. Certificate of state registration of software №2009614238.
6. Sapozhnikov S.Z. Osnovy gradientnoy teplometrii [Principles of gradient heat metering] SPb.: Polytechnic University Publ., 2012. 203 p.

About the authors

Dostovalova Sophia Sergeevna, postgraduate student of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: sophiadost@mail.ru. Area of Research: energy saving, cryogenics, swirling effect.

Serebryakov Rudolph Anatolyevich, Candidate of Science (Engineering), National Research Institute for Electrification of Agriculture, Moscow, Russian Federation. E-mail: ruds@list.ru. Area of Research: wind power engineering, energy saving, swirling effect.

Batukhtin Sergey Gennadyevich, postgraduate student of the Department of Thermal Power Plants, Transbaikal State University, Chita, Russian Federation. Area of Research: heating, energy saving, heat and mass transfer.

Batukhtin Andrew Gennadyevich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Thermal Power Plants, Transbaikal State University, Chita, Russian Federation. Area of Research: energy saving, heat and mass transfer, renewable energy sources.

УДК 621.431.75

ЗАДАЧА КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 Н. А. Зотин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье представлена в вербальной и математической формулировке задача контроля и прогнозирования технического состояния газотурбинного двигателя. Математическая формулировка задачи дана в виде трёхкомпонентной системы. Система включает в себя: исходные данные для решения задачи; набор условий и ограничений, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи; требуемый результат, который необходимо достичь при решении задачи.

Исходные данные для решения задачи включают в себя: множества зарегистрированных в различные моменты времени значений параметров силовой установки и параметров внешней среды, а также наборы экспертных заключений о техническом состоянии газотурбинных двигателей.

Ограничениями, которые накладываются при решении задачи, являются фиксированный перечень регистрируемых параметров силовой установки, а также отсутствие возможности целенаправленно расширять базу эмпирических данных.

Требуемым результатом, который необходимо достичь при решении задачи, являются модель определения контрольных, диагностических, прогностических параметров; функция вычисления признаков технического состояния; функция экстраполяции значений признаков технического состояния; множество критериев контроля, диагностики и прогнозирования.

Каждый из перечисленных компонентов задачи раскрыт в статье с использованием семантики множеств и мультимножеств.

Контроль, прогнозирование, газотурбинный двигатель, постановка задачи, контрольные и прогностические параметры, контрольные и прогностические признаки, мультимножество.

Одной из основных задач в сфере эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) является задача установления их технического состояния (ТС) и закона его изменения.

В настоящее время существует ряд методов, которые частично решают задачу контроля и прогнозирования ТС ГТД.

К наиболее объективным существующим методам визуального контроля ГТД следует отнести эндоскопический и рентгенографический. Основным недостатком этих методов является отсутствие возможности их оперативного применения ввиду того, что они трудоёмки, продолжительны и иногда требуют демонтажа ГТД с борта летательного аппарата (ЛА) [1, 2].

Параметрический контроль [3] более оперативен, так как может быть проведён без демонтажа ГТД с борта ЛА. Однако демонтаж силовой установки при её диа-

гностировании позволяет расширить перечень измеряемых параметров двигателя, повысить точность их измерения и обеспечить возможность управлять внешней средой, в которой находится ГТД.

Трендовый анализ является частным случаем параметрического контроля, так как в его основе лежит обработка зарегистрированных в полёте данных о параметрах ГТД.

В случае обеспечения достаточного уровня объективности общим недостатком параметрических методов является их ориентированность на определённую модель двигателя. Заявленные «универсальные» методы и средства оценки ТС ГТД используют обобщённые критерии оценки технического состояния и в целях повышения их объективности требуют доработок для каждого отдельного экземпляра двигателя.

Отдельным видом контроля ТС ГТД являются методы с применением нейросетевых моделей [4, 5, 6]. Однако при всей своей гибкости они пока не нашли широкого применения и находятся на стадии разработок.

Поэтому существует актуальная задача создания оперативных методов контроля, прогнозирования, диагностики ТС ГТД и средств их реализации на основе анализа полётных данных, которые обеспечивают:

- формирование контрольных и прогностических признаков для любого конкретного экземпляра ГТД (или группы экземпляров);

- объективный контроль и прогнозирование на основе сформированных признаков.

Данная задача может быть представлена трёхкомпонентной системой:

$$\mathcal{K} = [\mathcal{K}_3, \mathcal{K}_{тр}, \mathcal{K}_{усл}], \quad (1)$$

где \mathcal{K}_3 – исходные данные для решения задачи; $\mathcal{K}_{тр}$ – результат, который необходимо достичь при решении задачи; $\mathcal{K}_{усл}$ – условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения.

Рассмотрим каждый компонент системы (1).

1. Исходные данные для решения задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Ввиду того, что аналитическое описание ГТД не обеспечивает построение его точных моделей [7], то разрабатываемые методы и средства будут основываться на анализе эмпирических данных.

На данный момент для разработки указанных методов и средств существует объёмная база данных, представленная множеством полётных файлов, записанных бортовыми автоматизированными системами контроля. Каждый файл содержит зарегистрированные значения параметров систем самолёта и условий по-

лёта с частотой от 1 до 25 Гц в зависимости от наименования параметра.

К регистрируемым параметрам ГТД относятся: частота вращения ротора вентилятора двигателя, ротора турбины высокого давления, ротора турбины среднего давления; угол установки рычага управления двигателем; температура газов за турбиной среднего давления двигателя; общая степень повышения давления в компрессорах двигателя; расход топлива двигателя; вибросмещение вентилятора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; виброскорость турбокомпрессора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; суммарная степень повышения давления по высотной градуировочной характеристике, по наземной градуировочной характеристике в двигателе и др.

К регистрируемым параметрам внешних условий относятся: температура наружного воздуха, заторможенного потока наружного воздуха; давление наружного воздуха и др.

Формально значения параметров, записанных в полётный файл, можно представить мультимножеством

$$U = \{k(u_1) \cdot u_1, k(u_2) \cdot u_2, \dots, k(u_i) \cdot u_i, \dots, k(u_{n_U}) \cdot u_{n_U}\},$$

где $k(u_i) \cdot u_i$ – компонент мультимножества U , содержащий все измеренные за полёт $k(u_i)$ раз значения параметра u_i ; n_U – число регистрируемых параметров. В формальной записи

$$U = \{k(u_i) \cdot u_i\}_{i=1}^{n_U}. \quad (2)$$

Перечень регистрируемых параметров является опорным множеством $SuppU$ мультимножества U :

$$SuppU = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_{n_U}\} = \{u_i\}_{i=1}^{n_U}, \quad (3)$$

где u_i – регистрируемый параметр.

Следует отметить, что поскольку каждый из полётных файлов описывает совершившийся полёт, то известно и случившееся в течение него (если оно было) авиационное происшествие, связанное с двигателем. Следовательно, известны и состояния двигателей на начало полётов, которые уже произошли.

Таким образом, в рамках предоставленной информации, каждый j -й полёт можно описать парой

$$[U, s_k]^j,$$

где U в паре $[U, s_k]^j$ – мультимножество зарегистрированных значений параметров за j -й полёт; s_k в паре $[U, s_k]^j$ – техническое состояние ГТД на начало j -го полёта.

База полётных файлов состоит из хронологически структурированных наборов, соответствующих истории эксплуатации множества экземпляров ГТД:

$$W = \{W_i\}_i^{n_W},$$

где W – множество экземпляров ГТД; W_i – i -й образец ГТД; n_W – количество образцов ГТД.

Таким образом, множество эмпирических данных представлено множеством пар

$$\left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}.$$

Здесь U в паре $[U, s_k]^{i,j}$ – мультимножество зарегистрированных значений параметров за j -й полёт i -го образца ГТД; s_k в паре $[U, s_k]^{i,j}$ – техническое состояние ГТД на начало j -го полёта i -го образца ГТД; N_i – количество полётов i -го образца ГТД; n_W – количество образцов ГТД.

Таким образом, исходные данные для решения задачи \mathcal{K}_3 (1) имеют вид:

$$\mathcal{K}_3 = \left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}. \quad (4)$$

2. Результат, который необходимо достичь при решении задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Для получения результата требуется:

2.1. Из первичной информации, представленной в полётных файлах разрозненным множеством величин различных параметров, выделить те из них, на основании которых можно сформировать диагностические признаки. Другими словами, построить модель M_{SuppU}^{SuppV} выделения множества $SuppV$ из надмножества $SuppU$ (3):

$$SuppV = \{v_i\}_{i=1}^V,$$

где $SuppV$ – множество контрольных и прогностических параметров, $SuppV \subset SuppU$; $SuppU$ – перечень регистрируемых параметров (3); v_i – контрольный и прогностический параметр из множества $SuppV$.

Зарегистрированные в течение полёта контрольные и прогностические параметры представляют мультимножество

$$V = \{k(v_i) \cdot v_i\}_{i=1}^{n_V}, \quad (5)$$

где $k(v_i) \cdot v_i$ – компонент мультимножества V , содержащий все измеренные за полёт $k(v_i)$ раз значения параметра v_i .

2.2. Получить функцию F_V^B вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков B на основании множества зарегистрированных значений параметров V (5). Множество контрольных и прогностических признаков имеет вид

$$B = \{b_i\}_{i=1}^{n_B},$$

где b_i – i -й контрольный и прогностический признак; n_B – число контрольных и прогностических параметров.

2.3. Сформировать множество K критериев контроля и прогнозирования ТС ГТД:

$$K = \{k_j\}_{j=1}^{n_s},$$

где k_j – критерий принадлежности ГТД к ТС s_j , $s_j \in S = \{s_j\}_{j=1}^{n_s}$; s_j – j -е состояние ГТД из множества S ; S – множество ТС ГТД; n_s – количество ТС ГТД.

Каждый критерий имеет вид

$$k_j: \left[\left[\bigwedge_{i=1}^{n_B} [b_i \in d_j(b_i)] \right] = true \right] \Rightarrow \Rightarrow W_k = W^{s_j},$$

где k_j – критерий принадлежности ГТД к ТС s_j ; b_i – i -й контрольный и прогностический признак; $d_j(b_i)$ – область значения признака b_i , соответствующая ТС s_j ; $true$ – достоверное событие (истинное высказывание); $W = W^{s_j}$ – символьная запись того, что объект W находится в состоянии s_j .

Множество критериев прогнозирования идентично множеству критериев контроля, за исключением того, что критерии контроля применяются к признакам ТС ГТД, определённым в настоящий момент времени, а критерии прогнозирования ТС – к признакам, значения которых вычисляются для будущего момента времени.

2.4. Для решения задачи прогнозирования получить функции экстраполяции значений контрольных и прогностических признаков, которые составляют множество

$$f = \{b_i(t_{np}) = f(t_{np}, \{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}})\}_{i=1}^{n_B}.$$

Здесь f – множество функций экстраполяции; $b_i(t_{np})$ – зависимость значения признака b_i от будущего момента времени t_{np} , для которого прогнозируется ТС;

$f(t_{np}, \{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}})$ – функция экстраполяции; t_{np} – время, соответствующее экстраполируемому значению признака b_i ; $\{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}}$ – множество пар, каждая из них содержит значение момента времени t и вычисленное значение признака b_i в этот момент; n_{t_0} – количество вычисленных значений признака b_i до момента времени t_0 (настоящего момента времени); n_B – число контрольных и прогностических параметров.

Таким образом, виртуальная модель желаемого состояния предмета \mathcal{K}_{mp} (1) имеет вид тетрады:

$$\mathcal{K}_{тр} = [M_{SuppU}^{SuppV}, F_V^B, f, K], \quad (6)$$

где M_{SuppU}^{SuppV} – модель выделения контрольных и прогностических параметров из множества регистрируемых; F_V^B – функция вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков на основании множества зарегистрированных значений параметров; f – множество функций экстраполяции значений признаков ТС; K – множество критериев контроля ТС ГТД.

3. Условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Неустранимым ограничением при разработке требуемых методов и средств является отсутствие возможности специально дополнять базу эмпирических данных недостающей информацией:

3.1. Неосуществимо расширение перечня параметров, характеризующих состояние ГТД, так как внесение дополнительных датчиков в конструкцию ГТД понижает его функциональность, а использовать средства дистанционного измерения при полёте самолёта невозможно. Даже если дополнительные датчики будут

внесены, то реализация большого количества налётов нескольких экземпляров ГТД для сбора дополнительных данных займёт значительное время.

В математической формулировке это означает, что опорное множество $SuppU$ (3) мультимножества U (2), то есть множество-перечень параметров, является постоянным:

$$SuppU = \{u_i\}_i^{n_U} = const,$$

где u_i – регистрируемый в полёте параметр; $SuppU$ – носитель мультимножества U (3).

3.2. Нереализуемо увеличение количества экспериментов для описания конкретного режима работы двигателя или его работы в определённых условиях. Эксперимент в данном случае сводится к наблюдению без возможности воздействия на объект, поскольку при полёте ЛА (то есть в процессе регистрации параметров, составляющих базу данных) пилот выполняет определённую лётную задачу и не нацелен на сбор недостающей информации.

В математической формулировке это означает следующее.

Если обозначить желаемый набор эмпирических данных, то есть исходную информацию для решения задачи, символом \mathcal{K}_3^* , то вероятность того, что $\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*$, не будет равна единице:

$$\mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) \neq 1.$$

Таким образом, условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи, имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_{\text{усл}} &= [SuppU = const, \\ \mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) &\neq 1]. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя (4), (6), (7), запишем задачу с трёхкомпонентной системой (1) в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= [\mathcal{K}_3, \mathcal{K}_{\text{тр}}, \mathcal{K}_{\text{усл}}] = \\ &= \left\{ \left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}, [M_{SuppU}^{SuppV}, F_V^B, f, K], \right. \\ &\quad [SuppU = const, \\ &\quad \left. \mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) \neq 1 \right\}. \end{aligned}$$

Здесь U в паре $[U, s_k]^{i,j}$ – мультимножество зарегистрированных значений параметров за j -й полёт i -го образца ГТД; s_k в паре $[U, s_k]^{i,j}$ – техническое состояние ГТД на начало j -го полёта i -го образца ГТД; N_i – количество полётов i -го образца ГТД; n_W – количество образцов ГТД; M_{SuppU}^{SuppV} – модель выделения контрольных и прогностических параметров из множества регистрируемых; F_V^B – функция вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков на основании множества зарегистрированных значений параметров; f – множество функций экстраполяции значений признаков ТС; K – множество критериев контроля ТС ГТД; $SuppU$ – множество-перечень регистрируемых параметров; \mathcal{K}_3 – исходные данные для решения задачи; \mathcal{K}_3^* – желаемый набор исходных данных для решения задачи; $\mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*)$ – вероятность равенства $\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*$.

Таким образом, представлена формальная постановка задачи контроля и прогнозирования ТС ГТД, в результате решения которой будут получены модели определения контрольных и прогностических параметров, вычисления контрольных и прогностических признаков и установления ТС двигателя в интересующий момент времени.

Библиографический список

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа, 2002. 355 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 248 с.
3. Киселёв Ю.В., Епишев Н.И. Диагностика газотурбинных двигателей и их узлов по термогазодинамическим и виброакустическим параметрам. Самара: СГАУ, 2007. 188 с.
4. Богуслаев А.В., Дубровин В.И., Субботин С.А. Методы неитеративного синтеза многослойных нейронных сетей в задачах диагностики авиадвигателей // Вестник двигателестроения. 2004. № 1. С. 86-93.
5. Васильев В.И., Жернаков С.В. Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей // Контроль. Диагностика. 2009. № 2. С. 54-61.
6. Жернаков С.В. Диагностика параметров авиационного ГТД на основе нейронных сетей // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 12. С. 50-60.
7. Кулагин В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. М.: Машиностроение, 2003. 327 с.

Информация об авторе

Зотин Никита Александрович, аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: NikitaEAT@yandex.ru. Область научных интересов: диагностика технических систем.

CHECK AND PREDICTION OF GAS-TURBINE ENGINE'S TECHNICAL STATE

© 2014 N. A. Zotin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The problem of check and prediction of a gas-turbine engine's technical state is presented in verbal and mathematical statements in the paper. The mathematical statement of the problem is presented as a ternary system. This system consists of three components: initial data for solving the problem; a set of conditions and restrictions to be accomplished in the process of solving the problem; the required result to be obtained by solving the problem. The initial data for solving the problem consist of a set of propulsion unit parameters and environment parameters registered at different time moments as well as sets of expert reports on the technical state of gas-turbine engines. Among the limitations imposed when solving the problem we can name a fixed list of the registered parameters of the power plant as well as the absence of the possibility of purposefully extending the base of empirical data. The required result to be obtained by solving the problem includes: a model for determining check, diagnostic and prognostic parameters; the function of calculating the criteria of the technical state; the function of extrapolating the above-mentioned criteria; a set of control, diagnostic and prognostic criteria.

Each component is described in the paper using the semantics of sets and multisets.

Control, prediction, gas-turbine engine, problem statement, check and prediction parameters, check and prediction criteria, multiset.

References

1. Eliseev U.S., Krimov V.V., Malinowskiy K.A., Popov V.G. Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinykh dvigateley [Maintenance, diagnostics and repair of gas-turbine engines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2002. 355 p.
2. Keba I.V. Diagnostika aviacionnykh gazoturbinykh dvigateley [Diagnostics of aviation gas-turbine engines. Moscow: Transport Publ., 1980. 248 p.
3. Kiselev U.V., Epishev N.I. Diagnostika gazoturbinykh dvigateley i ikh uzlov po termogazodinamicheskim i vibroakusticheskim parametram [Diagnostics of gas-turbine engines and their units on the basis of their thermogasdynamic and vibroacoustic parameters]. Samara: Samara State Aerospace University Pub., 2007. 188 p.
4. Boguslayev A.V., Dubrovin V.I., Subbotin S.A. Methods of non-iterative synthesis of multilayer neural networks in tasks of aviation engine diagnostics // Vestnik dvigatelestroeniya. 2004. No. 1. P. 86-93. (In Ukr.)
5. Vasiliev V.I., Zhernakov S.V. Identification of aviation engine parameters on the basis of neural networks // Testing. Diagnostics. 2009. No. 2. P. 54-61. (In Russ.)
6. Zhernakov S.V. Diagnostics of aviation engine parameters on the basis of neural networks // Aerospace instrument-making. 2003. No. 12. P. 50-60. (In Russ.)
7. Kulagin V.V. Teoriya, raschet i proectirovanie aviacionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Theory, calculation and design of aviation engines and power plants]. Moscow: Mechanical Publ., 2003. 327 p.

About the author

Zotin Nikita Alexandrovich, post-graduate student, Aircraft Maintenance Department, Samara State Aerospace University,

Samara, Russian Federation. E-mail: NikitaEAT@yandex.ru. Area of research: diagnostics of engineering systems.

УДК 621.431.75

О ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ СОСТОЯНИИ И ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГТЭ-45-3

© 2014 Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царёва

Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

Рабочие лопатки компрессоров газотурбинных двигателей являются наиболее ответственными деталями среди всех узлов газотурбинных энергетических установок. Они изготавливаются из хромистых нержавеющей сталей. Основными видами повреждений компрессорных лопаток при длительной эксплуатации являются эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности, а также усталостное разрушение. Целью данной работы являлась разработка методов восстановления работоспособности материала компрессорных лопаток энергетической установки ГТЭ-45-3 с целью продления их срока службы. Для изучения постэксплуатационного состояния компрессорных лопаток и работоспособности материала были исследованы рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя энергетической установки ГТЭ-45-3 после отработки назначенного ресурса с наработкой 50 000 часов, изготовленные из коррозионно-стойких сталей ЭИ961 (13X11H2B2MФ) и 12X13. Для оценки работоспособности материала лопаток использовали нестандартный подход и оригинальные методики. В статье приведены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств коррозионно-стойких сталей. Разработан технологический процесс восстановления работоспособности материалов с целью продления ресурса лопаток компрессора, включающий последовательность операций: механическая обработка для удаления механических и коррозионных дефектов, аргоно-дуговая наплавка для восстановления геометрических размеров лопаток, термический отпуск для снятия остаточных напряжений.

Газотурбинная энергетическая установка, компрессорные лопатки, карбидная фаза, релаксационные испытания, предел текучести, термическая обработка, продление ресурса.

Введение

Рабочие лопатки компрессоров газотурбинных двигателей являются наиболее ответственными деталями среди всех узлов газотурбинных энергетических установок. Они изготавливаются из хромистых нержавеющей сталей. Основными видами повреждений компрессорных лопаток при длительной эксплуатации являются эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности, а также усталостное разрушение. Газотурбинные энергетические машины ГТЭ-45-3 и ГТЭ-35-770-2 для тепловых электростанций Якутии были сконструированы ещё в 80-е годы прошлого столетия. В настоящее время они до сих пор находятся в эксплуатации, при этом фактическая наработка лопаточного аппарата превышает назначенный ресурс. В связи с этим остро стоит вопрос о разработке высокотехнологичных и энергосберегающих методов продления ресурса, что позволит снизить затраты на замену теплонапря-

жённых узлов энергетического оборудования. Поэтому разработка ремонтно-восстановительных технологий, основанных на научном анализе постэксплуатационного состояния материала компрессорных лопаток, является своего рода «скорой помощью» в критической ситуации, когда нет возможности замены на новые установки или отдельные узлы. Целью данной работы являлась разработка методов восстановления работоспособности материала компрессорных лопаток энергетической установки ГТЭ-45-3 с целью продления их срока службы.

Методика исследований

Для изучения постэксплуатационного состояния компрессорных лопаток и работоспособности материала были исследованы рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя энергетической установки ГТЭ-45-3 после отработки назначенного ресурса с наработкой 50 000

часов, изготовленные из коррозионно-стойких сталей ЭИ961 (13X11Н2В2МФ) и 12Х13.

Микроструктурные исследования выполнены на электронном микроскопе «TESCAN/VEGA». Твёрдость по Виккерсу материала определяли ультразвуковым твердомером МЕТ-У1 по ГОСТ 22761-77.

Для оценки работоспособности материала лопаток использовали нестандартный подход и оригинальные методики. Предел прочности материала определяли неразрушающим методом с помощью ультразвукового твердомера МЕТ-У1 по ГОСТ 22761-77 непосредственно с рабочей поверхности лопаток, так как процессы деградации материала и накопления дефектов развиваются, как правило, в поверхностной зоне детали. Для определения физического предела текучести σ_T и предела микропластичности σ_0 (или предела упругости) использовали метод релаксационных испытаний [1] на оригинальной автоматизированной установке высокой жёсткости «Релаксометр» с использованием программного обеспечения АУР1. Для этого были вырезаны миниатюрные образцы размером $2,7 \times 2,7 \times 6,0$ мм из зоны выходной кромки лопаток, подверженной при эксплуатации наибольшим температурным и механическим нагрузкам, а также воздействию коррозионной среды и эрозионного потока. Данный подход более правомерен по сравнению с использованием стандартного метода испытаний на растяжение, так как испытания более крупных образцов, вырезанных из срединной части пера, дают усреднённые данные для более глубоких слоёв основного материала и не отражают реальную ситуацию.

Результаты исследований

Объектом исследования являлись лопатки осевого компрессора газотурбинного двигателя газотурбинной энергетической установки ГТЭ-45-3 после эксплуатации в реальных условиях работы тепловой станции. Визуально-оптическим осмотром установлено, что в процессе

эксплуатации на поверхности рабочих лопаток компрессора образуются дефекты эрозионного, механического и коррозионного происхождения: забоины, изгибы и износ входной и выходной кромок, разрывы металла, вмятины. На рабочей поверхности пера обнаружены многочисленные очаги питтинговой коррозии, преимущественно со стороны корыта. Фото лопаток после эксплуатации представлены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Внешний вид рабочих лопаток 3 и 10 ступеней компрессора после эксплуатации:
а – ЭИ961, б – 12Х13

Компрессорные лопатки 1–4 ступеней были изготовлены из стали ЭИ961 (13X11Н2В2МФ). Сталь ЭИ961 – жаропрочная (нержавеющая) высоколегированная сталь мартенситного класса, предназначенная для изготовления нагруженных деталей, длительно работающих при температуре до 600 °С.

Анализ микроструктуры показал, что материал лопаток 1–4-й ступеней после эксплуатации находится в удовлетворительном состоянии. Выделения упрочняющей карбидной фазы в виде прерывистых включений (размером 0,1–0,2 мкм) расположены по границам зёрен, по телу зерна видны крупные карбиды размером 0,5–1 мкм, единичные включения имеют размер до 5 мкм. Микротрещин по границам зёрен не обнаружено (рис. 2). Размер зерна основной фазы (мартенсита) соответствует требованиям, предъявляемым к данному типу штамповок.

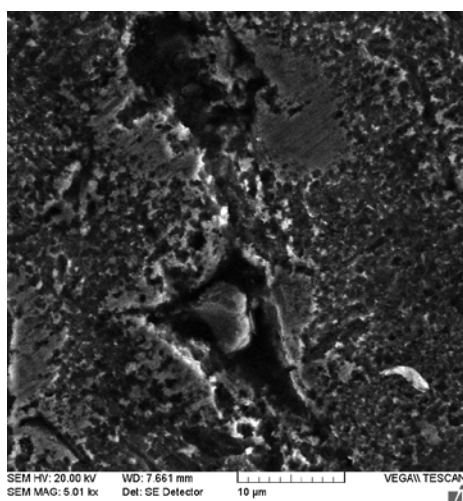


Рис. 2. Микроструктура стали ЭИ961 после эксплуатации (X5000)

Компрессорные лопатки разных ступеней работают при различных температурах в интервале от 100 до 400 °С. С увеличением температуры эксплуатации механические свойства материала при увеличении времени эксплуатации начинают изменяться и возрастает вероятность хрупкого разрушения. Используя справочные данные [2] физических свойств стали ЭИ961, по методике, предложенной в работе [3], был рассчитан коэффициент пластичности при разных температурах по формуле:

$$\delta_n = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2)(\text{НВ}/E),$$

где $\nu=0,3$ – коэффициент Пуассона [2], E – модуль Юнга, НВ – твёрдость.

Проведённые расчёты показали, что нагрев стали ЭИ961 выше 400 °С приводит к снижению коэффициента пластичности δ_n ниже 0,8, что способствует ухудшению пластических свойств материала (табл. 1).

На основании анализа постэксплуатационного состояния лопаток 1–4 ступеней, изготовленных из стали ЭИ961, был разработан технологический процесс восстановления работоспособности материала и продления ресурса лопаток, включающий последовательность операций: механическая обработка для удаления механических и коррозионных дефектов, аргоно-дуговая наплавка проволокой ЭИ400 для восстановления геометрических размеров лопаток, термический отпуск при температуре 600 °С в течение двух часов для снятия остаточных напряжений.

Таблица 1. Значение коэффициента пластичности для стали ЭИ961 при разных температурах

Температура, °С	Модуль Юнга E , ГПа	Твёрдость НВ , ГПа	Коэффициент пластичности δ_n
20	200	4,30	0,840
100	198	4,30	0,838
200	187	4,32	0,828
300	175	4,20	0,821
400	165	4,32	0,805
500	145	3,90	0,799
600	109	3,80	0,740

Микроструктура основного материала восстановленных лопаток приведена на рис. 3. После проведения термического отпуска изменений фазового состава стали ЭИ961 не наблюдается. Достигнуто улучшение гомогенности микроструктуры. Границы зёрен – чёткие и ровные, упрочнены равномерно распределённой по границам карбидной фазой с размером включений от 0,1 до 1 мкм.

В табл. 2 приведены механические характеристики стали ЭИ961, полученные из релаксационных испытаний, в постэксплуатационном состоянии и после термического отпуска.

После термической обработки установлено снижение предела микропластичности и предела текучести на 20 и 8 % соответственно, при этом средние значения соответствуют требованиям ТУ 3619-020-90351370-2013 на данную сталь.

Результаты измерений твёрдости и предела прочности представлены в табл. 3. В постэксплуатационном состоянии твёрдость находится в пределах от 2,30 до 2,62 ГПа. После проведения термического отпуска установлено выравнивание значений твёрдости по перу лопатки и незначительное снижение (на 3 %) предела

прочности. Полученные показатели механических свойств соответствуют нормам ТУ (HV=2,00 – 4,50 ГПа, предел прочности - не ниже 850 МПа). Твёрдость металла в наплавленной зоне после термического отпуска составляет HV=2,33 ГПа, что также соответствует требованиям ТУ.

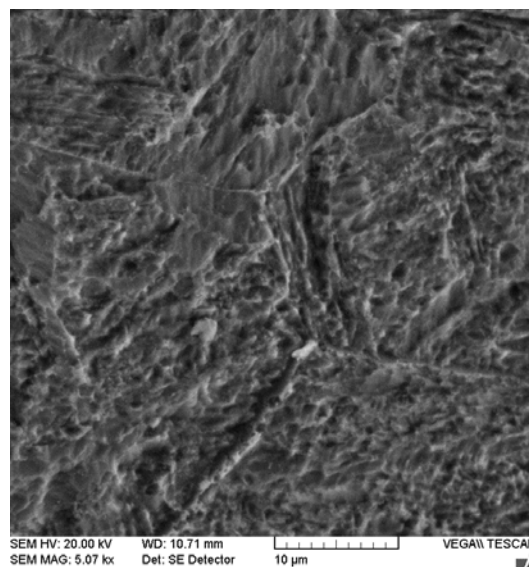


Рис. 3. Микроструктура стали ЭИ961 после термического отпуска (X5000)

Таблица 2. Механические характеристики стали ЭИ961, полученные из релаксационных испытаний

Состояние материала	№ образца	σ_0 , МПа	σ_T , МПа
После эксплуатации	1	310	735
	2	330	775
	3	310	735
Среднее значение		317	750
После термического отпуска	4	225	700
	5	270	680
Среднее значение		250	690

Таблица 3. Результаты измерений твёрдости и предела прочности материала рабочих лопаток компрессора

Образец	Место измерения	Твёрдость HV, ГПа	Предел прочности, σ_B , МПа
После эксплуатации	Середина пера	2,50	920
	Выходная кромка	2,40	
	Входная кромка	2,30	
	Замковая часть	2,62	970
После термического отпуска	Середина пера	2,50	890
	Выходная кромка	2,52	
	Входная кромка	2,52	
	Замковая часть	2,50	920

Лопатки 6–16-й ступеней компрессора были изготовлены из стали 12X13. Согласно ГОСТ 5632-72 сталь 12X13 [2] имеет повышенную пластичность и рекомендована для изготовления деталей, подвергающихся ударным нагрузкам и воздействию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре). Важным свойством стали 12X13 является высокий декремент затухания – способность гасить упругие колебания. 12-процентные хромистые стали с небольшим содержанием $C \sim 0,1\%$ при медленном охлаждении с высоких температур приобретают перлитно-ферритную структуру.

При визуально-оптическом осмотре на лопатках после эксплуатации обнаружены механические дефекты в виде забоин, геометрических нарушений профиля и кромок пера, а также очаги точечной питтинговой коррозии. Трещин не обнаружено.

Методом оптической металлографии установлено, что материал лопаток в постэксплуатационном состоянии имеет кондиционную микроструктуру. Однако отмечается появление микропористости и гетерогенности в микроструктуре, проявляющейся в коагуляции карбидной фазы (рис.4).



Рис. 4. Микроструктура материала рабочей лопатки компрессора ГТЭ-45-3 из стали 12X13 в постэксплуатационном состоянии (X500)

Данное состояние микроструктуры ухудшает пластические свойства материала. Для устранения признаков деградации структуры и повышения её гомогенности необходимо проведение восстановительной термической обработки.

Установлено, что основной материал имеет твёрдость $HV=3,40$ ГПа. Вблизи рабочей поверхности (на глубине 15 мкм) пера материал лопаток имеет пониженные по сравнению с основой значения твёрдости $HV=2,30-2,50$ ГПа, обусловленные воздействием повышенных температур и коррозионной среды. Для удаления повреждённого поверхностного слоя необходимо проведение механической обработки посредством тонкого шлифования и полирования. Для восстановления профиля и геометрических размеров в зонах входной и выходной кромок были проведены наплавочные работы методом аргонодуговой сварки проволокой 04X19H11M3 с последующим термическим отпуском при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$ в течение двух часов. Микроструктура стали после термического отпуска представлена на рис. 5.

После проведения восстановительных работ твёрдость материала перовой части лопаток разных ступеней понизилась и составляет $HV=1,55-1,65$ ГПа.

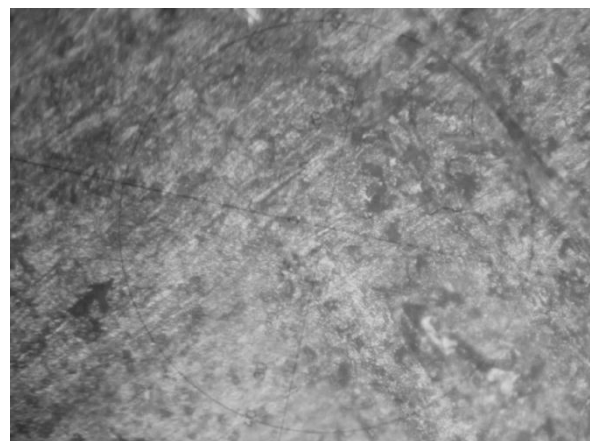


Рис. 5. Микроструктура материала рабочей лопатки компрессора ГТЭ-45-3 из стали 12X13 после термического отпуска ($700\text{ }^\circ\text{C} - 2$ часа) (X500)

Снижение твёрдости способствует повышению пластических свойств и понижает риск охрупчивания материала при дальнейшей эксплуатации. Предел текучести, определённый из релаксационных испытаний, составляет 435 МПа. Предел прочности материала лопаток разных ступеней находится в пределах 620–680 МПа. Полученные показатели механических свойств соответствуют требованиям, предъявляемым к данной марке стали [2].

В табл. 4 приведены механические характеристики стали 12X13, полученные из релаксационных испытаний в постэксплуатационном состоянии и после термического отпуска. Установлено увеличение среднего значения предела микропластичности после термообработки на 40 %. Это означает, что пластическая деформация в микрообъёмах будет происходить

при более высоких напряжениях, что повышает работоспособность материала.

После проведения последовательности ремонтно-восстановительных работ (механическая обработка, аргонодуговая наплавка, термический отпуск) был проведён выходной контроль методом цветной капиллярной дефектоскопии (набор пенетрантов OVERCHECK). По результатам контроля дефектов на поверхности лопаток не обнаружено (рис. 6). Комплект компрессорных лопаток, восстановленных по данной технологии, поставлен в повторную эксплуатацию (с назначенным ресурсом 40 000 часов) на тепловую электростанцию и в настоящее время проходит натурные испытания. Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Якутская энергоремонтная компания».

Таблица 4. Механические характеристики стали 12X13, полученные из релаксационных кривых

Состояние материала	№ образца	σ_0 , МПа	σ_T , МПа
После эксплуатации	1	165	440
	2	120	420
Среднее значение		142	430
После термического отпуска	3	200	450
	4	205	420
Среднее значение		202,5	435



Рис. 6. Внешний вид восстановленных компрессорных лопаток ГТЭ-45-3 после проведения цветной капиллярной дефектоскопии

Заключение

Анализ постэксплуатационного состояния рабочих лопаток осевого компрессора энергетической установки ГТЭ-45-3 показал, что материал не имеет недопустимых повреждений, но его микроструктура имеет деградированное состояние, проявляющееся в гетерогенности микроструктуры (в стали ЭИ961) и коагу-

ляции карбидной фазы (в стали 12X13). Дальнейшая надёжность работы таких лопаток не может быть гарантирована. На основании проведённых исследований разработана технология продления их ресурса, включающая последовательность операций: механическую обработку, аргонодуговую наплавку и термический отпуск.

Библиографический список

1. Скуднов В.А., Чегуров М.К. Релаксация напряжений в металлах и сплавах: метод. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2010. 30 с.

2. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и

сплавов. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

3. Мильман Ю.В., Голанов Б.А., Чугунова С.И. Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости. Киев, 1992. 25 с.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru

ka@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Царёва Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

POST-OPERATION STATE AND EXTENSION OF SERVICE LIFE OF COMPRESSOR BLADES OF THE GAS-TURBINE POWER PLANT GTE-45-3

© 2014 Y. P. Tarasenko, O. B. Berdник, I. N. Tsareva

Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Gas turbine engine compressor blades are the most essential parts among all the units of gas turbine power plants. They are made of chromium stainless steels. Erosive and corrosive wear of working surfaces as well as thermal stress fatigue are the main types of damage of compressor blades after long-term use. The aim of this work was to develop methods of recovering the serviceability of the material of the power plant ГТЭ-45-3 compressor blades with a view to extending their service life. To examine the post-operation state of compressor

blades and the material serviceability the compressor blades of the gas turbine engine power plant ГТЭ-45-3 made of corrosion-resistant steels ЭИ961 (13X11H2B2MФ) and 12X13 were investigated after their service life expired with the total engine hours equal to 50000. To evaluate the serviceability of the blade material an unconventional approach and know-how were used. The results of analysis of the microstructure of corrosion-resistant steels as well as their physical and mechanical properties are presented in the paper. A process of material serviceability recovery is developed with a view to extending the service life of compressor blades. The process includes the following sequence of operations: machining aimed at removing corrosion and mechanical defects, argon-arc welding that restores the geometry of the rotor blades, thermal tempering for removing residual stress.

Gas-turbine power plant, compressor blades, carbide phase, relaxation tests, yield point, heat treatment, service life extension.

References

1. Skudnov V.A., Chegurov M.K. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh. Metodicheskoe posobie [Relaxation of tension in metals and alloys. Teaching aid].* Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod St. Tech. Univ. Publ., 2010. 30 p.
2. Zubchenko A.S., Cones M.M., Kashirsky Yu.V. et. all. *Marochnik staley i splavov [Steel and Alloy Grade Guide].* Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
3. Milman Yu.V., Golanov B.A., Chugunova S.I. *Kharakteristika plastichnosti, poluchaemaya pri izmerenii tverdosti [Plasticity characteristic, obtained in measuring hardness].* Kiev: Publ., 1992. 25 p.

About the authors

Tarasenko Yury Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, physics of plasma.

УДК 620.179.16:62-135

СТРУКТУРНАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА

© 2014 Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Е. А. Мотова, Н. Е. Никитина

Институт проблем машиностроения Российской академии наук,
г. Нижний Новгород

Объектами исследований являются рабочие лопатки из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 (13X12H2B2MФ) шестой и восьмой ступеней ротора турбокомпрессора двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии и они же – после термического отпуска. Предметами исследования являются параметр собственной акустической анизотропии и коэффициент структурной анизотропии карбидной фазы материала турбокомпрессорных лопаток в состоянии после эксплуатации и последующего термического отпуска. Цель работы: показать перспективность ультразвукового эхо-импульсного метода – как неразрушающего метода контроля структуры материала непосредственно на изделии – как на стадии выходного контроля при изготовлении и ремонте лопаток, так и в состоянии после эксплуатации. Анализ структуры материала лопаток проведён методами оптической металлографии с использованием программного обеспечения «GoodGrains.» и ультразвукового эхо-импульсного метода неразрушающего контроля. Методом оптической металлографии установлено, что в материале перовой части лопаток в постэксплуатационном состоянии присутствует карбидная фаза игольчатой формы с высокой степенью анизотропии, являющаяся признаком деградации микроструктуры. Отмечено положительное влияние термического отпуска на однородность распределения карбидной фазы в материале рабочих лопаток ротора ТКВД. Выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом металлографической анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток. Эхо-импульсный неразрушающий метод контроля структуры дает перспективные возможности его применения на любой стадии выходного контроля непосредственно на изделии.

Турбокомпрессор высокого давления (ТКВД), компрессорные лопатки, ультразвуковой эхо-импульсный метод, акустическая анизотропия, структурная анизотропия.

Введение

На современном этапе развития машиностроения, когда техника становится всё более сложной, выборочный контроль ответственных деталей, работающих в тяжёлых эксплуатационных условиях, становится недостаточным, так как в полной мере не может гарантировать высокую работоспособность и надёжность. Акустические методы неразрушающего ультразвукового контроля хорошо зарекомендовали себя в диагностике дефектов, нарушающих сплошность конструкционного материала, но практически не используются для исследований неоднородностей микроструктуры конструкционных материалов. Однако ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля может быть весьма перспективным при оценке структурной неоднородности конструкционного материала, особенно на

заключительной стадии изготовления ответственных деталей, таких как рабочие лопатки ТКВД.

Методика исследований

Объектами экспериментальных исследований являются рабочие лопатки из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 (13X12H2B2MФ) шестой и восьмой ступеней ротора ТКВД двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии и они же – после термического отпуска.

Для проведения исследования микроструктуры материала рабочих лопаток применён метод металлографического анализа с использованием растрового оптического микроскопа «Неофот-32». Для определения коэффициента структурной анизотропии карбидной фазы использовано программное обеспечение GoodGrains. Коэффициент структурной анизотропии

находили, используя отношения размеров включений карбидной фазы вдоль их длины и ширины:

$$C = \frac{d_{cp}}{l_{cp}}, \quad (1)$$

где l_{cp} – средний продольный размер; d_{cp} – средний поперечный размер карбидной фазы.

Термический отпуск (ТО) проводился в лабораторной электропечи при температуре 600°C в течение двух часов с последующим охлаждением испытуемых деталей на воздухе [1].

Акустические измерения проведены эхо-импульсным неразрушающим методом с использованием акустического стенда на базе серийного прибора И2-26 [2], а также пьезоэлектрического преобразователя сдвиговых волн частотой 9 МГц, размером 8x8 мм. При применении сдвиговых волн важной характеристикой является относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимноперпендикулярной поляризации. При возникновении напряжений или пластической деформации вдоль определённого направления в материале скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперёк этого направления, будут различны. Выбранный безразмерный параметр – величина акустической анизотропии материала – может служить количественной характеристикой структурных изменений в нём [3]. Также этот параметр в определённой степени показывает наличие текстуры и размеров зёрен различных структурных составляющих.

Для лопаток шестой и восьмой ступеней проведены прецизионные (с погрешностью 0,01 мкс) измерения задержек в материале импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль (направление 1) и поперёк (направление 2) оси лопатки. Контролю подвергалась зона пера лопатки у галтели, подверженная при эксплуатации наибольшим рабочим нагрузкам. Им-

пульсы распространялись по нормали к поверхности лопатки, несколько раз «прозвучивая» толщину детали. На основании прецизионных измерений задержек импульсов в материале вычислены параметры собственной акустической анизотропии материала лопаток в точке контроля:

$$a_0 = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \times 100\%, \quad (2)$$

где t_1 – задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной вдоль оси лопатки; t_2 – задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной поперёк оси лопатки.

Как принято в неразрушающем контроле, величина задержки отсчитывалась от первого отражённого импульса. Точность определения величины a_0 по результатам измерения временного интервала между первым и третьим эхо-импульсами составила 0,3 %.

Результаты исследований

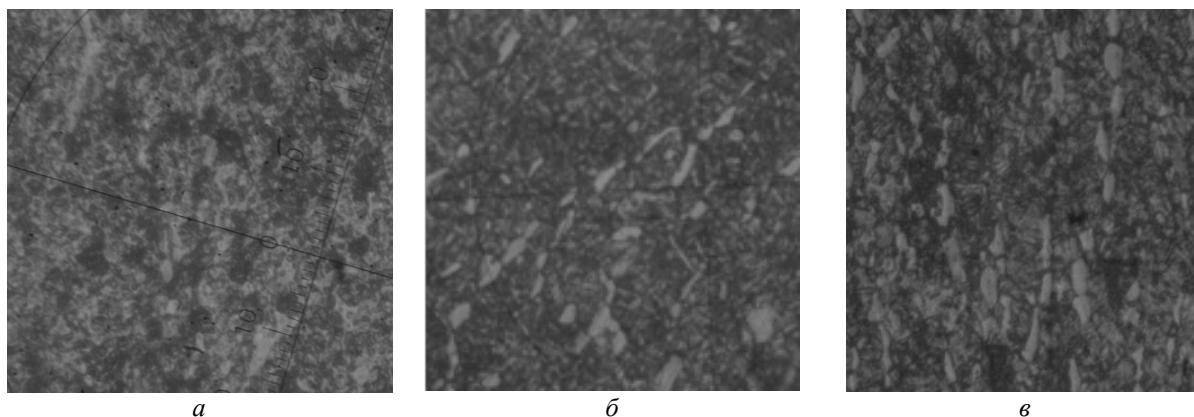
На рис. 1 представлены фотографии внешнего вида рабочей лопатки шестой ступени ротора турбокомпрессора высокого давления двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии (рис. 1, а), а также после последующего термического отпуска и механической обработки (рис. 1, б).

На рис. 2 приведены фотографии микроструктуры материала замковой части, торцевой части пера, а также части пера, вырезанной из галтели, лопатки шестой ступени после эксплуатации. Материал замка имеет микроструктуру, характерную для сплава ЭИ 961 с однородным распределением фаз.

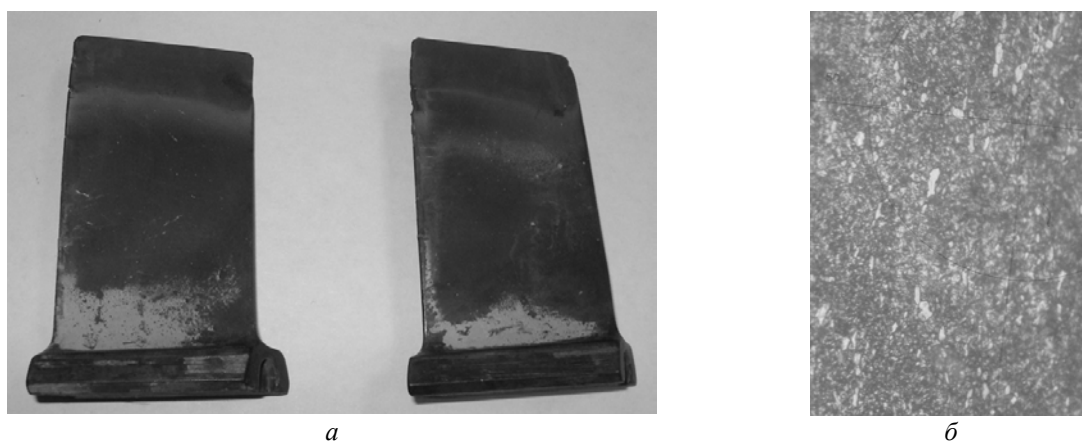
На рис. 3 представлены фотографии внешнего вида рабочей лопатки восьмой ступени непосредственно после эксплуатации (рис. 3, а) и микроструктура материала на торце пера лопатки (рис. 3, б).



а *б*
 Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки ТКВД шестой ступени:
 а – после эксплуатации; б – после термической и механической обработок



а *б* *в*
 Рис. 2. Микроструктура материала лопатки шестой ступени после эксплуатации:
 а – замковая часть (x500); б – торцевая часть пера (x500); в – перовая часть лопатки у галтели (x500)
 (вертикальное направление на снимках соответствует продольному направлению перовой части лопатки)



а *б*
 Рис. 3. Лопатка ТКВД восьмой ступени:
 а – внешний вид после эксплуатации; б – структура на торце пера лопатки (x500)
 (вертикальное направление на снимках соответствует продольному направлению перовой части лопатки)

Структура для лопаток шестой и восьмой ступеней идентична. По всей длине пера лопатки наблюдается наличие строчной карбидной фазы (игл), вытянутой в поперечном направлении. Их длина варьируется от 4 до 10 мкм, а ширина - от 0,5 до 2 мкм для лопаток шестой ступени, для лопаток восьмой ступени соответственно 2,5-4,5 мкм и 0,8-1,2 мкм. Можно предположить, что в процессе эксплуатации в результате длительного воздействия рабочих напряжений и повышенных температур произошла структурная деградация материала, так как в материале замковой части лопатки «игольчатой» карбидной фазы не наблюдается (рис. 2, а).

На рис. 4 показана характерная микроструктура материала лопаток шестой и восьмой ступеней после термического отпуска.

В микроструктуре стали ЭИ961 после термического отпуска карбидные включения приобрели более округлую форму, но следы игольчатой карбидной фазы сохранились во всех исследуемых образцах, при этом длина «иголок» уменьшилась в среднем в 2,5 раза для лопаток шестой ступени и в 1,2 раза для лопаток восьмой ступени.

В табл. 1 приведены результаты определения параметра акустической анизотропии и размеров карбидной фазы в материале лопаток двух ступеней. После термообработки в лопатках шестой и восьмой ступеней наблюдается снижение величины a_0 , что может быть связано с изменением формы включений карбидной фазы. В лопатках 6.1, 8.2, для которых размер карбидной фазы после ТО наименьший, уровень акустической анизотропии самый низкий.

На рис. 5, 6 приведены гистограммы параметра структурной анизотропии, определённой по размерам карбидной фазы, и параметра акустической анизотропии в материале лопаток шестой и восьмой ступеней после ТО.

Следует отметить, что величина акустической анизотропии является интегральным параметром, в который вносят вклад разные структурно-фазовые составляющие. По результатам экспериментов обнаружена корреляция между параметром акустической анизотропии и коэффициентом анизотропии карбидной фазы, определённым методом оптической металлографии, для лопаток после термообработки.

Таблица 1. Параметр акустической анизотропии и размеры карбидной фазы в материале лопаток в постэксплуатационном состоянии и после ТО

№ образца лопатки	$a_0, \%$ в постэксплуатационном состоянии	$a_0, \%$ после ТО	Размеры карбидной фазы, после ТО	
			длина, мкм	ширина, мкм
6.1	0,90	0,05	1 - 3	0,5 - 1
6.2	0,44	0,17	2,2 - 4	1 - 2,2
6.3	1,4	0,55	2 - 4	2 - 3
8.1	1,65	0,44	2 - 4	1 - 2,5
8.2	1,13	0,05	1,8 - 3	0,2 - 1
8.3	1,3	0,96	2,5 - 3	1,8 - 2,2

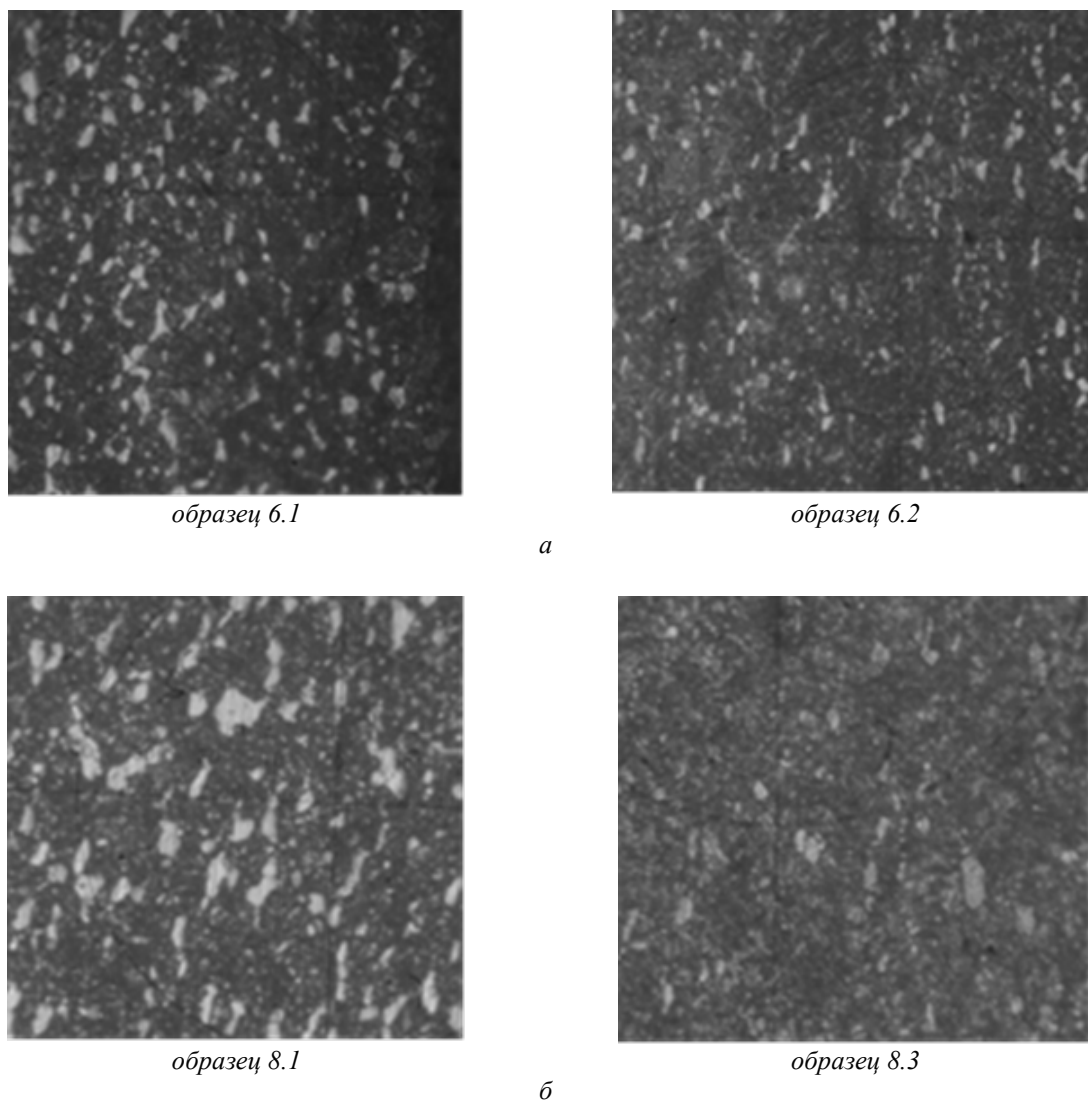


Рис. 4. Микроструктура материала лопаток после термического отпуска:
 а – шестая ступень (x500); б – восьмая ступень (x500)
 (вертикальное направление на снимках соответствует
 продольному направлению перовой части лопатки)

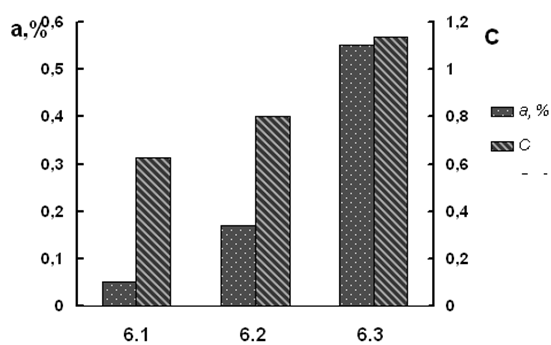


Рис. 5. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток шестой ступени после термического отпуска

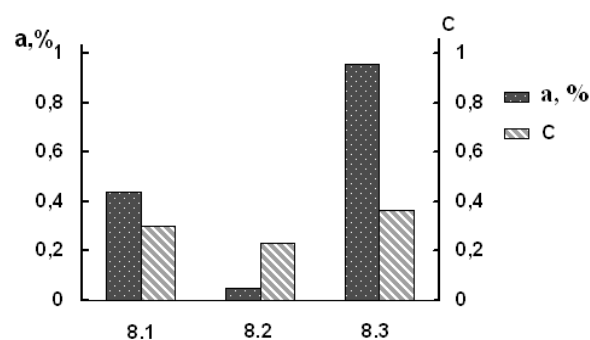


Рис. 6. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток восьмой ступени после термического отпуска

Выводы

1. Методом оптической металлографии установлено, что в материале перовой части лопаток в постэксплуатационном состоянии присутствует карбидная фаза игольчатой формы с высокой степенью анизотропии, являющаяся признаком деградации микроструктуры.

2. Выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом металлографии

ческой анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток.

3. Отмечено положительное влияние термического отпуска на однородность распределения карбидной фазы в материале рабочих лопаток ротора ТКВД.

4. Показаны перспективные возможности применения ультразвукового эхоимпульсного метода в качестве неразрушающего метода контроля структуры материала непосредственно на изделии, как на стадии выходного контроля при изготовлении и ремонте лопаток, так и в состоянии после эксплуатации.

Библиографический список

1. Царёва И.Н., Бердник О.Б., Кривина Л.А., Фель Я.А. Оценка технического состояния рабочих лопаток компрессора из сплава ЭИ961 энергетической установки ГТЭ-45-3 // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Н. Новгород: Интелсервис, 2013. № 22 (1). С. 37-42.

2. Моничев С.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковой эхо-метод исследования

упругих свойств твёрдых тел. Препринт № 24-04-03 / Нф ИМАШ РАН. Н. Новгород, 2004. 22 с.

3. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 88-95.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Кривина Людмила Александровна, научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Мотова Елена Алексеевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Никитина Надежда Евгеньевна, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

STRUCTURAL AND ACOUSTIC ANISOTROPY OF TURBOCOMPRESSOR BLADE MATERIAL

© 2014 Y. P. Tarasenko, L. A. Krivina, E. A. Motova, N. Ye. Nikitina

Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science
Nizhny Novgorod, Russian Federation

The investigation is concerned with working compressor blades of the sixth and eighth stages of the turbo-compressor rotor of the ДЖ59Л engine made of stainless ЭИ961 (13X12H2B2MФ) heat-resistant steel in a post-operation state and the same blades after tempering. The objects of research are the parameter of intrinsic acoustic anisotropy and the structural anisotropy factor of the carbide phase of material of turbo-compressor blades in post-operation state and subsequent tempering.

The aim of the study is to show that the ultrasonic echo technique holds promise as a method of nondestructive control of the material structure directly on the product both at the stage of output control in the production and repair of blades, and in the post-operation state.

The analysis of the blade material structure is carried out using the methods of optical metallography with the use of the "GoodGrains" software and ultrasonic echo technique of nondestructive control.

Using the method of optical metallography it was established that a carbide phase of acicular shape is present in the material of blade airfoil with a high degree of anisotropy, which indicates the degradation of microstructure in the post-operation state. Positive influence of tempering on the uniformity of carbide phase distribution in the material of rotor blades is noted.

Correlation between the parameter of acoustic anisotropy and the metallographic anisotropy factor of inclusions of a carbide phase in the blade material is revealed.

The echo technique of nondestructive control of structure shows great promise for application at any stage of output control directly on a product.

High-pressure turbo-compressor, compressor blades, ultrasonic echo technique, acoustic anisotropy, structural anisotropy.

References

1. Tsarova I.N., Berdnik O.B., Krivina L.A., Fel Ya.A. Otsenka of technical condition of working shovels of the compressor from an alloy of EI961 of the power GTE-45-3 installation // Sbornik nauchnykh trudov «Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya». No. 22 (1). Nizhniy Novgorod: Intelservis Publ., 2013. P. 37-42. (In Russ.)
2. Monichev S.A., Nikitina N.Ye. Ultrazvukovoy echo method of research of elastic properties of solid bodies. Pre-print No. 24-04-03 / Nf of IMASH Russian Academy of Sciences. N. Novgorod, 2004. 22 p.
3. Motova E.A., Nikitina N.E., Tarasenko Y.P. Concerning the possibility of examining compressor blades according to attenuation and speed of ultrasound // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2013. V. 42, no. 4. P. 335-340.

About the authors

Tarasenko Yury Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Krivina Lyudmila Aleksandrovna, research assistant, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: strengthening and recov-

ery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

Motova Elena Alekseevna, Candidate of Science (Engineering), senior research associate, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

Nikitina Nadezhda Evgenyevna, Doctor of Science (Engineering), Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

УДК 621.793+621.431.75

ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ НА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ ПОДСЛОЕ, ПОЛУЧЕННОЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ, ДЛЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 Ю. П. Тарасенко¹, И. Н. Царёва¹, О. Б. Бердник¹,
Я. А. Фель¹, Д. Г. Федорченко²

¹Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

²ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

В статье обсуждается задача защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур рабочей поверхности турбинных лопаток, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов. Улучшение эксплуатационных свойств теплозащитного покрытия достигается за счёт повышения энергетических характеристик процесса плазменного напыления (температура плазменного потока, среднемаховая скорость истечения плазменной струи) на модернизированном оборудовании с использованием плазмотрона ПНК-50. Особое значение в работе уделено изучению высокотемпературной стабильности сплава ЖС6Ф, так как в процессе высокоэнергетического плазменного напыления происходит сопутствующий нагрев подложки. В работе изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры теплозащитного покрытия диоксида циркония, сформированного на интерметаллидном подслое системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», напылённого из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13 с разной дисперсностью частиц. Приведены результаты исследований структуры, физико-механических свойств и эффективности теплозащиты покрытия диоксида циркония, сформированного методом высокоэнергетического плазменного напыления и предназначенного для обеспечения теплозащиты турбинных лопаток газотурбинных двигателей. Согласно результатам исследования разработанные покрытия предназначены для защиты от высокого градиента температур при пусковых нагрузках, газовой коррозии и эрозионного износа турбинных лопаток ГТД различного назначения.

Высокоэнергетическое плазменное напыление, теплозащитное покрытие, диоксид циркония, интерметаллидный подслои, высокотемпературная газовая коррозия.

Введение

При длительной эксплуатации с высокими термомеханическими нагрузками в среде горючих газов турбинные лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) подвержены высокотемпературной газовой коррозии и эрозионному износу. В данной работе задача защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур рабочей поверхности турбинных лопаток, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов, решается посредством использования теплозащитного покрытия диоксида циркония, сформированного на интерметаллидном подслое системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» методом высокоэнергетического плазменного напыления.

Методика исследований

Улучшение эксплуатационных свойств теплозащитного покрытия достигается за счёт повышения энергетических характеристик процесса плазменного напыления (температура плазменного потока 5000-12000 К, среднемаховая скорость истечения плазменной струи $V=2400$ м/с) на модернизированном оборудовании (на базе установки «Киев-7» с использованием плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции и повышенной мощности ~50 кВт) [1] с линейной и кольцевой схемой ввода порошка.

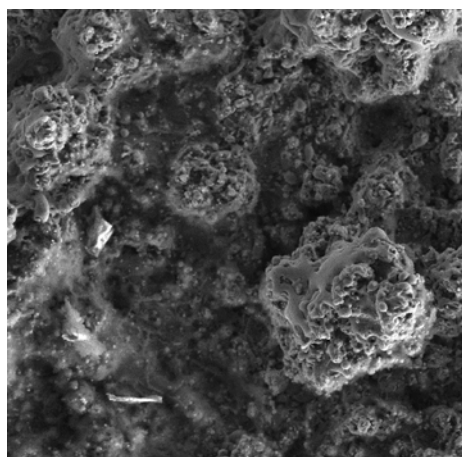
Исследования выполнены на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф, используемого при изготовлении рабочих лопаток турбин авиационных ГТД, с учётом микроструктуры и физико-механических свойств основного матери-

ала. В работе использованы методы рентгенографии, электронной микроскопии, измерения плотности, пористости и шероховатости, испытания твёрдости, жаростойкости, эффективности теплозащиты и термоусталости.

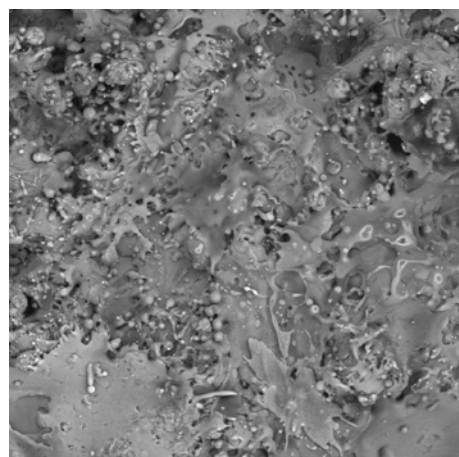
Результаты исследований

В работе изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры интерметаллидного подслоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», сформированного из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13 с разной дисперсностью частиц: 40/80 мкм и 20/60 мкм. Методом

рентгеноструктурного анализа установлено, что из порошка, имеющего однофазный интерметаллидный состав (β -MeAl), при высокоэнергетическом плазменном напылении формируется двухфазное покрытие интерметаллидного состава: (β -MeAl) + (γ' -Me₃Al) [2]. Уменьшение размерности порошковой смеси закономерно приводит к уменьшению размера и увеличению количества сфероидальных интерметаллидных зёрен, которые образуются при оплавлении граней частиц, проходящих через плазменную струю (рис. 1, 2).

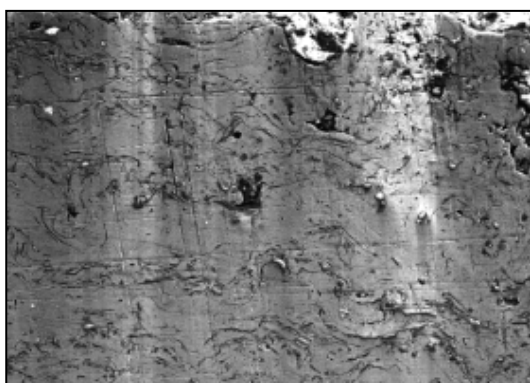


а (X1000)

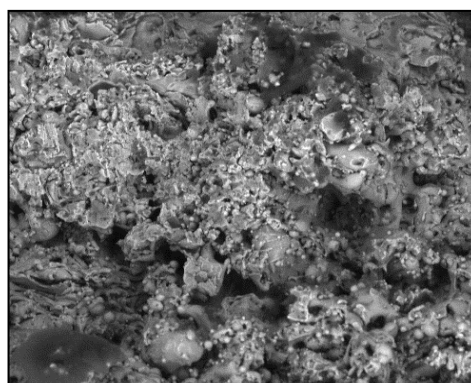


б (X2000)

Рис. 1. Микроструктура поверхности интерметаллидных подслоев, полученных из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13-1 с дисперсностью частиц: а - 40/80 мкм, б - 20/60 мкм



а



б

Рис. 2. Поперечное сечение интерметаллидных подслоев, полученных из порошковой смеси ПНК20Х20Ю13-1 с дисперсностью частиц: а - 40/80 мкм, б - 20/60 мкм (X1000)

Сравнительные механические характеристики подслоев, полученных из одной марки порошка, но разной дисперсности, приведены в табл. 1. Оба подслоя имеют хороший комплекс

физико-эксплуатационных свойств. При этом лучшими показателями плотности, твёрдости, шероховатости и жаростойкости обладает подслои, сформированный из смеси с дисперсностью 20/60 мкм.

Таблица 1. Сравнительные характеристики подслоев «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученных из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 разной дисперсности

Физико-механические характеристики подслоя	Дисперсность порошка 40/80 мкм	Дисперсность порошка 20/60 мкм
Фазовый состав	$\beta + \gamma'$ (~40 %)	$\beta + \gamma'$ (~30 %)
ρ , кг/м ³	7900	8200
P_o , %	0,7	1,6
H_{100} , ГПа	7,70	7,85
R_a , мкм	~7	~5
Отношение жаростойкости покрытия (500 ч) к жаростойкости основного материала $(\Delta m/m_0)^{500}/(\Delta m/m_0)^{Ma}$, отн.ед.	1,3	2,5

При выполнении работ по оптимизации эффективности теплозащиты рабочей поверхности турбинных лопаток из сплава ЖС6Ф изучены закономерности формирования фазового состава и микроструктуры покрытий ZrO_2 , сформированных на интерметаллидном подслое «Ni-Co-Cr-Al-Y» (с фазовым составом $\beta + \gamma'$) из порошковой смеси ЦрОИ-7 с разной дисперсностью частиц (~90 и ~40 мкм), вводимой в плазменную струю по разным схемам ввода порошка: линейной и кольцевой [3].

Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что из порошка с фазовым составом: тетрагональный - ZrO_2 + остаточный моноклинный - ZrO_2 , при высокоэнергетическом плазменном напылении формируется двухфазное покрытие из тетрагональной и кубической фаз (~10 %) с преобладанием первой. Методом дериватографии установлено, что фазовое превращение происходит при температуре

~840 °С и обусловлено термическим воздействием высокоэнергетического плазменного потока.

Уменьшение размерности порошковой смеси закономерно приводит к уменьшению размера и увеличению количества сфероидальных зёрен, которые образуются при оплавлении граней частиц, проходящих через плазменную струю (рис. 3). Микроструктура поперечного покрытия представлена на рис. 4.

Особенностью микроструктуры двухслойного покрытия является то, что на интерметаллидных зёрнах подслоя формируется микроструктура «ёлочного типа» (рис. 5, а) с размером столбчатых субзёрен ZrO_2 в поперечном сечении ~ 100 - 200 нм (рис. 5, б).

Оптимальный комплекс эксплуатационных свойств получен для покрытия диоксида циркония, сформированного из мелкодисперсной смеси при кольцевой схеме ввода порошка (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительные характеристики покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИ-7 различной дисперсности по разным схемам ввода порошковой смеси

Физико-механические характеристики покрытия	Линейный ввод порошка 40/90 мкм	Кольцевой ввод порошка 40 мкм
Общая пористость, %	9,5	4,3
Открытая пористость, %	1,5	1,0
Плотность ρ , кг/м ³	7100	7600
Твёрдость HV, Гпа	9,3	9,8
Шероховатость R_a , мкм	7,0	5,4

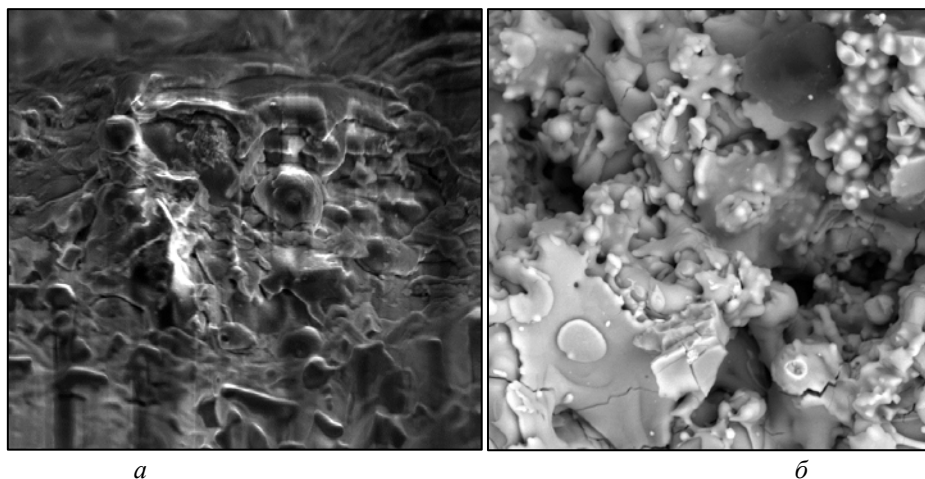


Рис. 3. Микроструктура поверхности покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИИ-7 с дисперсностью частиц: а - 40/90 мкм (линейный ввод), б - 40 мкм (кольцевой ввод) (X5000)

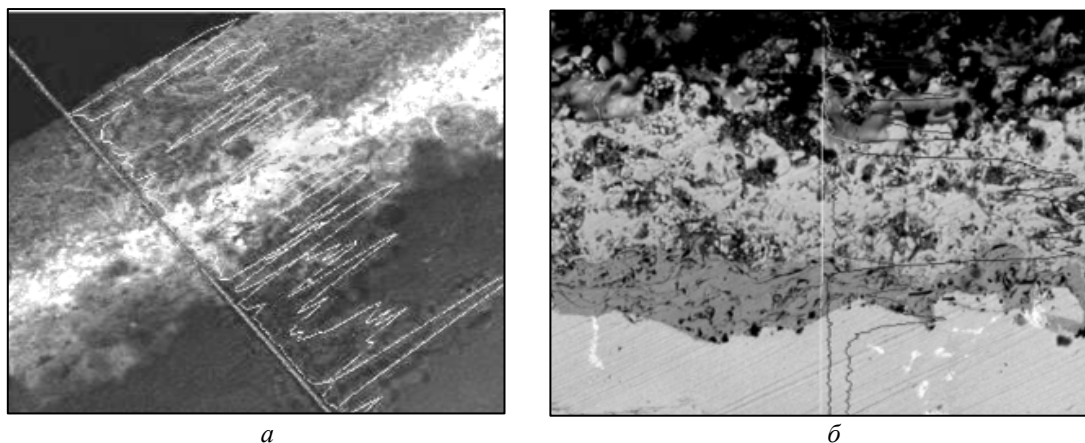


Рис. 4. Поперечное сечение покрытий диоксида циркония, полученных из порошковой смеси ЦрОИИ-7 с дисперсностью частиц: а - 40/90 мкм (линейный ввод), б - 40 мкм (кольцевой ввод) (X2000)

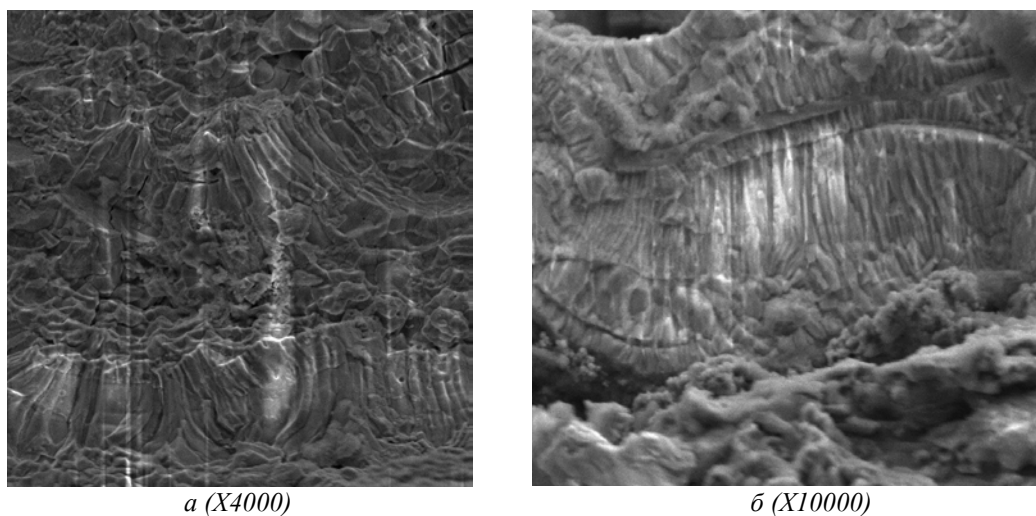


Рис. 5. Микроструктура (а) и субструктура (б) двухслойного теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂»

Особое значение в работе уделено изучению высокотемпературной стабильности сплава ЖС6Ф, так как в процессе высокоэнергетического плазменного напыления происходит сопутствующий нагрев подложки.

Свойства жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для изготовления лопаток газовых турбин, определяются термической стабильностью их микроструктуры, размерами, формой и количеством упрочняющей γ' -фазы, прочностными характеристиками γ -твёрдого раствора, оптимальным соотношением параметров кристаллических решёток γ - и γ' -фаз, распределением карбидной фазы. Обычно жаропрочные сплавы упрочняют путём целенаправленного многокомпонентного легирования. Суть многокомпонентного легирования состоит в обеспечении жаропрочности путём совершенствования гетерофазного строения, включающего контролируемое выделение частиц упрочняющей γ' -фазы, обеспечении её термической стабильности, целенаправленном изменении морфологии, параметров кристаллических решёток γ - и γ' - фаз, их влияния на дислокационную структуру сплавов, а также на протекание диффузионных процессов.

ЖС6Ф – литейный сплав на никелевой основе с высокой жаропрочностью (элементный состав: Ni- 50,3%, Fe- 12,2%, W-11,9%, Co- 4,9%, Cr-4,9%, Al-5,4%, Ti-1,1%, Nb-1,4%, V-1,1%, Zr-0,06%, C-0,12%, B-0,015%, Hf-следы). Максимальная рабочая температура сплава составляет 1050 °С. Легирование сплава алюминием и хромом обеспечивает формирование упрочняющих интерметаллидной и карбидной фаз, повышая его жаропрочность. Введение гафния усиливает карбидную ликвацию, способствует образованию в поверхностном слое карбидов Me_6C . Наличие ванадия и титана способствует дополнительному улучшению жаропрочных свойств.

По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что основной фазовой составляющей сплава ЖС6Ф яв-

ляется твёрдый раствор упрочняющих интерметаллидной, карбидной фаз и легирующих элементов в никеле (γ -Ni). Крупные выделения карбидной фазы расположены преимущественно по границам зёрен (рис.6).



Рис. 6. Микроструктура сплава ЖС6Ф (X250)

С целью изучения температурной стабильности сплава использовали метод релаксационных испытаний, позволяющий определять предел текучести (σ_T) и предел микропластичности (σ_0). Установлено увеличение предела микропластичности сплава ЖС6Ф на 42 % (с 250 до 355 МПа) и снижение предела текучести на 10 % (с 730 до 653 МПа) в результате высокотемпературного воздействия.

По результатам проведённых испытаний эксплуатационных свойств разработанного теплозащитного покрытия достигнуто увеличение жаростойкости поверхности лопатки из сплава ЖС6Ф в 4 раза, снижение температуры на стенке лопатки из этого сплава на 125 °С (рис. 7, 8) и увеличение термоциклической долговечности (до образования трещины на выходной кромке лопатки) на 34 %.

Заключение

Разработанные покрытия предназначены для защиты от высокого градиента температур при пусковых нагрузках, газовой коррозии и эрозионного износа турбинных лопаток ГТД различного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке и сотрудничестве с ОАО «КУЗНЕЦОВ».

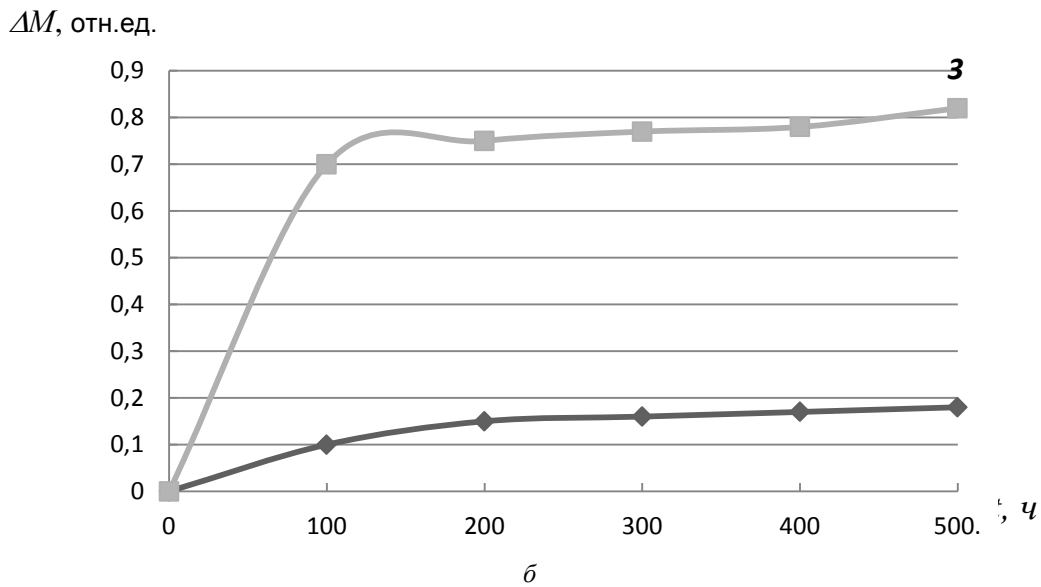
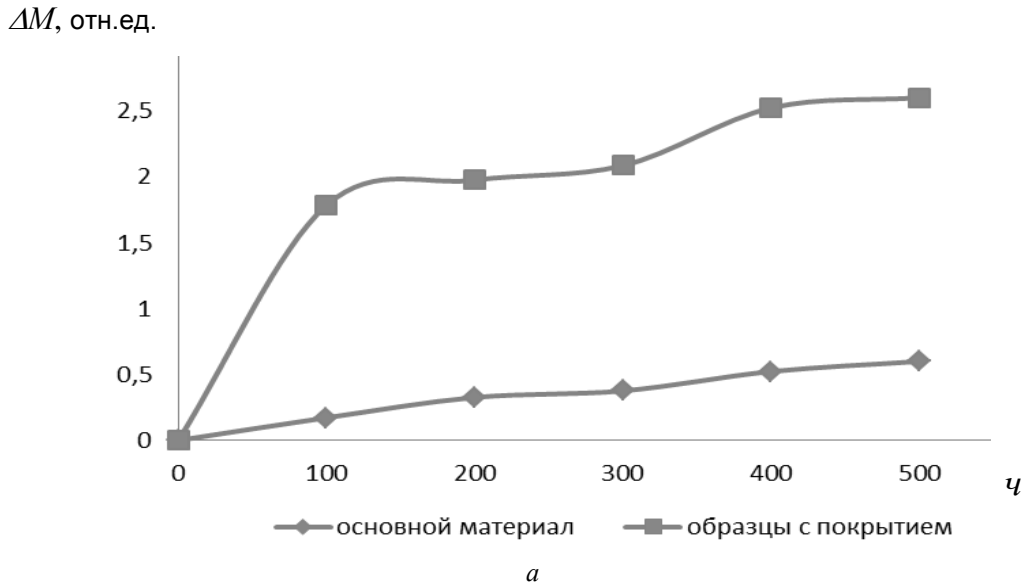


Рис. 7. Относительное изменение массы образцов из сплава ЖС6Ф до и после нанесения интерметаллидного подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y» (а) и теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂» (б) от времени изотермической выдержки:
 кривая 1 – сплав ЖС6Ф; кривая 2 – ЖС6Ф + подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y»;
 кривая 3 – ЖС6Ф+ ТЗП «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO₂»

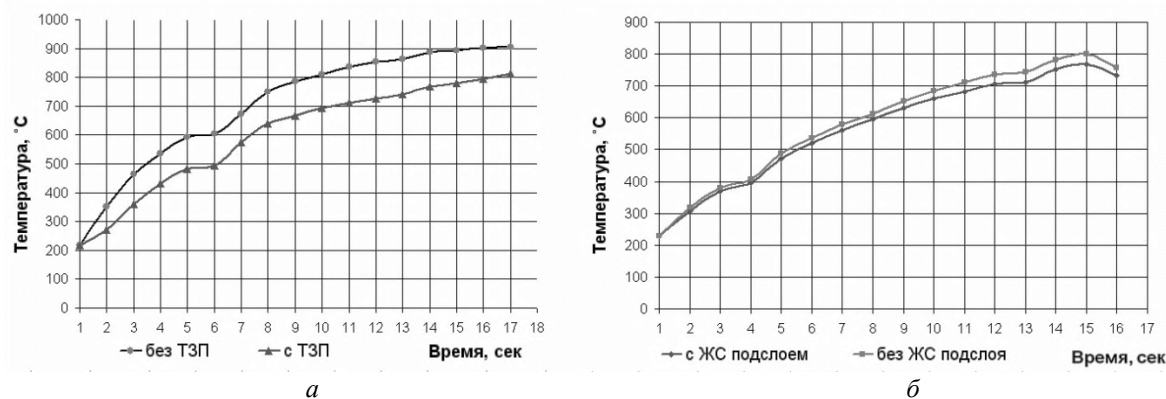


Рис. 8. Результаты оценки эффективности тепловой защиты металла с помощью ТЗП (а) и жаростойкого подслоя (б)

Библиографический список

1. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981. 219 с.

2. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с наночастицами. М.: МИСиС, 2008. 327 с.

3. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Разов Е.Н. Разработка высокоэнергетического плазменного метода нанесения теплозащитных покрытий диоксида циркония на турбинные лопатки ГТД // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Н. Новгород: Изд-во общества Интел-сервис, 2013. № 22 (1). С. 11-30.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Царёва Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук,

г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Фель Яков Абрамович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, генеральный конструктор ОАО «Кузнецов», г. Самара. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

HEAT-SHIELDING ZIRCONIUM DIOXIDE COATING ON AN INTERMETALLIC SUBSTRATE OBTAINED BY THE METHOD OF HIGH-ENERGY PLASMA SPRAYING FOR GAS-TURBINE ENGINE TURBINE BLADES

© 2014 Y. P. Tarasenko¹, I. N. Tsareva¹, O. B. Berdnik¹,
Ya. A. Fel¹, D. G. Fedorchenko²

¹Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²“KUZNETSOV” Open Joint-Stock Company, Samara, Russian Federation

The paper discusses the task of protecting the working surface of turbine blade made of heat-resistant nickel alloys against high-temperature gas corrosion and high temperature gradient. Improvement of the performance characteristics of a heat-shielding coating is achieved by increasing the energy characteristics of the plasma spraying process (temperature of the plasma flow, mass-average velocity of the plasma jet) with the help of up-to-date ЖС6Ф equipment using a ПНК-50 plasma torch. Special attention is given to the study of high-temperature stability of the alloy as the process of high-energy plasma spraying is associated with the heating of the substrate. The patterns of forming the phase composition and microstructure of the zirconium dioxide coating formed on the intermetallic substrate of the “Ni-Co-Cr-Al-Y” system, sprayed using the ПНК20Х20Ю13 powder mixture with particles of various dispersion are analyzed. The results of research of the structures, physical and mechanical properties as well as the efficiency of a zirconium dioxide heat-shielding coating, formed by high-energy plasma spraying and designed to provide thermal protection of turbine blades of gas turbine engines are presented. The results of the investigation showed that the coatings developed are designed to protect various-application gas turbine blades against the starting load high-temperature gradient, gas corrosion and erosive wear.

High-energy plasma spraying, heat-shielding coating, nickel alloy, zirconium dioxide, intermetallic substrate, high-temperature gas corrosion.

References

1. Zhukov M.F., An'shakov A.S., Zasyarkin I.M. Elektrodugovye generatory s mezhelektrodnymi vstavkami [Arc generators with interelectrode inserts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 219 p.
2. Kolobov Y.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et. all. Struktura i svoystva intermetallidnykh materialov s nanofaznym uprochneniem [Structure and properties of intermetallic materials with nanophased hardening]. Moscow: MISiS Publ., 2008. 327 p.
3. Tarasenko Y.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B., Fel Y.A., Razov E.N. Razrabotka vysokoenergeticheskogo plazmennogo metoda naneseniya teplozashchitnykh pokrytiy dioksida tsirkoniya na turbinnye lopatki GTD // Sbornik nauchnykh trudov «Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya». No. 22 (1). Nizhniy Novgorod: Intelservis Publ., 2013. P. 11-30. (In Russ.)

About the authors

Tarasenko Yuri Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian

Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Fel Yakov Abramovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Sen-

ior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Fedorchenko Dmitry Gennadevich, Candidate of Science (Engineering), General Designer of the JSC “KUZETSOV”, Samara, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, tribology, physics of plasma.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АЛ-31Ф В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2014 Г. С. Филиппов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Статья посвящена моделированию излучения силовой установки (СУ) летательного аппарата (ЛА) на примере исследования силовой установки АЛ-31Ф из серии высокотемпературных турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажными камерами. Изложены результаты исследования, посвящённого определению пространственного распределения лучистой энергии от сложных излучателей. Предлагается комплексный метод расчёта инфракрасного (ИК) излучения, основанный на математическом моделировании пространственного распределения лучистой энергии от сложного излучателя. Разработан алгоритм с использованием вероятностного метода Монте-Карло, что приближает смоделированный процесс испускания и отражения луча к реальному физическому, и применением нового метода расчёта индикатрисы в поглощающей среде от сложных излучателей. Выполнен расчёт распределения температур внутри сопла и моделирование геометрии СУ. На основе проведённых вычислений получено пространственное распределение инфракрасного излучения. Предложено устройство по снижению интенсивности излучения в широком диапазоне углов, проведён анализ его эффективности. Предложенное устройство позволило снизить расчётный уровень ИК-излучения более чем на 90% в диапазоне телесного угла задней полусферы. Приведён результат расчётов прямого (без учёта переотражения излучения внутри сопла) и также полного (с учётом переотражения) потока лучистой энергии для отдельных излучающих элементов на примере центрального эллипсоидного тела. Приведены результаты сравнения этих расчётов.

Метод Монте-Карло, распределение ИК-излучения, тепловое излучение, излучение летательного аппарата.

Главными источниками ИК-излучения в составе СУ являются детали двигателя, нагретые до высоких температур, и струя выхлопных газов. Излучающие элементы двигателя являются сложными составными геометрическими фигурами, где каждый элемент проявляет себя в качестве излучателя и отражателя, что вносит дополнительные трудности. В связи с этим возникает необходимость компактных программ расчёта излучения сложных устройств. Широкое распространение для решения этой задачи получил метод «обратного хода луча» [1]. Но для расчёта излучения СУ ЛА он не подходит, так как не позволяет рассчитывать системы с отражением, отличным от зеркального. Исследования излучения, проводимые для спускаемых космических аппаратов и межпланетных зондов различных классов [2], имеют ряд преимуществ, но не учитывают отражающие свойства поверхностей,

которые в условиях задачи расчёта излучения СУ ЛА играют важную роль.

Цель исследования – разработка метода расчёта излучения нагретых поверхностей сложных излучателей и распределения лучистых потоков в пространстве. Его основу составляет методика, подробно изложенная в [3,4] и базирующаяся на усложнённом итерационно-зональном методе расчёта переноса излучения Ю.А. Суринова [5].

Исходя из этого, предлагается комплексный метод расчёта ИК-излучения, основанный на математическом моделировании пространственного распределения потока лучистой энергии от сложного излучателя. На базе разработанного алгоритма формируется программное обеспечение с удобным интерфейсом. Результатом работы программы является построение пространственного распределения излучения СУ ЛА. Расчёт проводится с помощью метода Монте-

Карло, который предполагает физико-математические и численные модели для прямого и полного (с учётом переотражения, поглощения, рассеяния) инфракрасного излучения элементов турбины и реактивного сопла в заднюю собирающую полусферу.

Суть модели заключается в том, что внутренняя поверхность сопла представляется совокупностью элементарных поверхностей. Проводя газодинамические расчёты турбулентного течения газовой струи, определяют распределение температур внутри сопла и для каждой элементарной поверхности. Для излучающих микроэлементов случайным образом задаются направления лучей, выходящих из их центров. Считается, что вся энергия излучения микроэлемента или (ячейки) распространяется в указанном случайном направлении. После чего рассматривается распространение луча до выхода его из сопла или до пересечения его с другими элементарными поверхностями. При пересечении луча с другим микроэлементом СУ рассчитываются координаты точки пересечения и определяется новое случайное направление отражённого луча (ввиду отсутствия зеркального отражения). Энергия отражённого луча уменьшается в зависимости от коэффициента отражения поверхности, поглощения и рассеяния газовой струей. При выходе луча из сопла определяются координаты пересечения его с условной, разбитой на площадки полусферой. Каждая площадка на собирающей полусфере соответствует некоторому телесному углу

суммирования. Поток лучистой энергии, приходящейся на указанные площадки полусферы, запоминается и в случае попадания лучей в область одной площадки – суммируется. Таким образом, определяется пространственное распределение излучения СУ или индикатриса излучения. Принимая во внимание сложность модели, обусловленную большим количеством микроэлементов, характер отражения и тот факт, что излучение внутри СУ может испытывать отражение (и неоднократное), использование метода Монте-Карло является целесообразным по сравнению с другими существующими методами расчёта.

Разработанная модель легла в основу программного комплекса и прошла экспериментальную проверку [6]. Дальнейшее развитие описанной методики позволит в перспективе иметь совершенный инструмент расчёта оптических характеристик различных систем на начальных этапах проектирования излучающих устройств.

В качестве примера проведения расчётов и оценки ИК-излучения реальных излучателей проведено исследование СУ АЛ-31Ф (рис.1). Данная силовая установка, разработанная под руководством А.М. Люльки в НПО «Сатурн», относится к серии авиационных высокотемпературных турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажными камерами. Данная силовая установка применяется на истребителях четвёртого поколения СУ-27 и его модификациях. Исходные геометрические данные получены из [7].

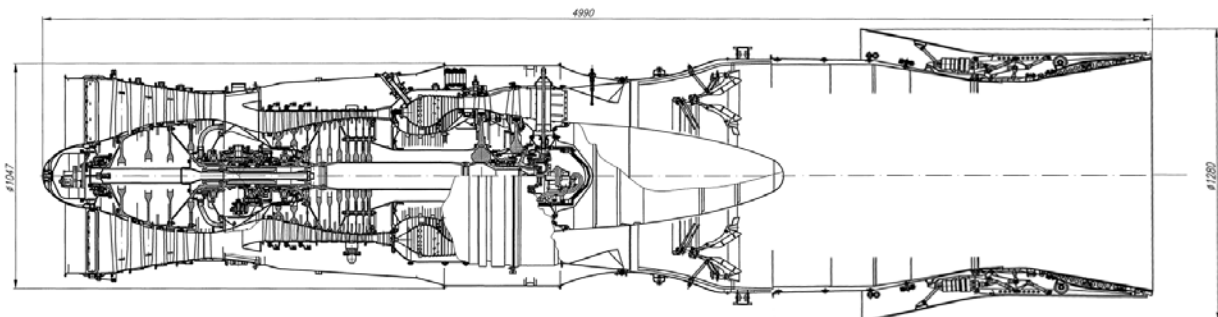


Рис. 1. Продольный разрез двигателя

Таблица 1. Исходные данные расчётов

Фигура	Температура, К	Количество ячеек	Степень черноты
Конус 1	1173	25500	0,85
Конус 2	1473	25500	0,85
Цилиндр	1373	25500	0,85
Гипербола 1	1573	25500	0,85
Гипербола 2	1573	25500	0,85
Турбина	1623	7500	0,85
Кок	1543	12000	0,85

Для вычислений сопло моделируется конусами, цилиндрами, гиперболами, турбина – кольцом, центральное тело – эллипсоидом. Распределение температур получено путём проведения газодинамического расчёта, описанного в [8]. Исходные данные, используемые в разработанной программе расчёта, приведены в табл. 1.

Внутренняя поверхность сопла, представляющая собой перечисленные геометрические поверхности вращения, разбивается на ряд элементарных излучающих площадок: по длине окружности на $m = 1 \dots m_{max}$, в виде изменения полярного угла $\theta_{c_m} = 360^\circ m / m_{max}$, по длине на $n = 1 \dots n_{max}$, задающихся в начальных условиях. Пересечение этих элементов образует ряд ячеек dS_n . Далее в основной системе координат (СК) центры ячеек рассчитываются для цилиндрических поверхностей по формулам:

$$X_{c_{m,n}} = R_n \cos \frac{(\theta_{c_m} + \theta_{c_{m-1}})}{2},$$

$$Y_{c_{m,n}} = R_n \sin \frac{\theta_{c_m} + \theta_{c_{m-1}}}{2},$$

$$Z_{c_{m,n}} = Z_{min} + \frac{(Z_{max} - Z_{min}) \cdot (n + 0.5)}{n_{max}},$$

где R_n – радиус соответствующей цилиндрической поверхности; θ_{c_m} – угол с центром на оси Z геометрической поверхности (лежащий в плоскости, параллельной плоскости X, Y).

Площадь ячеек dS рассчитывается как

$$dS = (2\pi R_n / m_{max}) (Z_{c_{min}} - Z_{c_{max}} / n_{max}).$$

Далее аналогичным образом определяется площадь и центры ячеек для других фигур разбиения сопла СУ ЛА. Для всех излучающих поверхностей СУ поочередно выбираются все ячейки и рассчитывается их площадь и прямоугольные координаты центров ячеек в основной СК. Интенсивность излучения ячейки (энергия луча) равна:

$$dQ_{\dots n} = \alpha \sigma T_{c_{\dots}}^4 dS_{\dots n},$$

где $dS_{\dots n}$ – площадь ячейки соответствующей поверхности сопла; $T_{c_{\dots}}$ – температура элементов сопла; α – степень черноты элементов сопла; $\sigma = 5,668 \times 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Учитывается рассеяние, поглощение и уменьшение мощности потока.

Для центров $(X_{c_m}, Y_{c_m}, Z_{c_m})$ элементарных поверхностей dS_m задаются локальные системы координат. Рассчитывается вероятность распределения луча по азимутальному углу $\theta_{r_{m,n}}$ и по зенитному углу $\beta_{m,n}$. Распределение вероятности направления луча определяется путём задания локальных координат $X01_{m,n}, Y01_{m,n}, Z01_{m,n}$ вершины единичного вектора (длиной ρ), направленного из центра ячейки, в полусферу радиуса ρ . Затем полученные результаты переводятся в основную СК.

Определяется пространственное распределение прямого излучения в сферической СК. Рассчитываются координаты $Xr \dots_{m,n}$, $Yr \dots_{m,n}$, $Zr \dots_{m,n}$ пересечения луча с полусферой суммирования путём совместного решения уравнений луча и радиуса L сферы согласно выражениям с учётом затенения поверхностью сопла. Для элементов сопла согласно выражениям (для других фигур аналогично):

$$\frac{(Xrc_{m,n} - Xc_{m,n})}{(Xc_{m,n} - Xc_{m,n})} = \frac{(Yrc_{m,n} - Yc_{m,n})}{(Yc_{m,n} - Yc_{m,n})} = \frac{(Zrc_{m,n} - Zc_n)}{(Zc_{m,n} - Zc_n)},$$

$$Xrc_{m,n}^2 + Yrc_{m,n}^2 + Zrc_{m,n}^2 = L^2.$$

Определяется поток энергии Q_i в пределах шага зенитного угла φ_i путём сравнения углов $\varphi_{r_{m,n}}$ координат $Xr_{m,n}, Yr_{m,n}, Zr_{m,n}$ лучей на заданной полусфере и суммирования энергий этих лучей:

$$Q_i = \sum_{n=1}^{n \max} \sum_{m=1}^{m \max} \text{if} \left[\varphi_{i-1} \leq \left(\arccos \frac{Zrc_{m,n}}{L} \right) \leq \varphi_i, dQ_n, 0 \right].$$

Рассчитывается мощность потока E_{si} ИК-излучения сопла СУ в единице телесного угла (Вт/Ср) с площадью ячейки собирающей полусферы dF_i :

$$E_{si} = (Q0_i + Q1_i + \dots + Q \dots_i) L^2 / dF_i.$$

Результаты расчётов мощности потока ИК-излучения для СУ АЛ-31Ф приведены на рис. 2.

Проведя анализ полученной зависимости, можно сделать вывод, что излучение имеет высокий уровень в широком диапазоне углов.

Для снижения этого уровня предложен специальный экран. Он представляет собой цилиндрическую поверхность, расположенную за срезом сопла. Диаметр экрана превышает диаметр сопла (рис. 3).

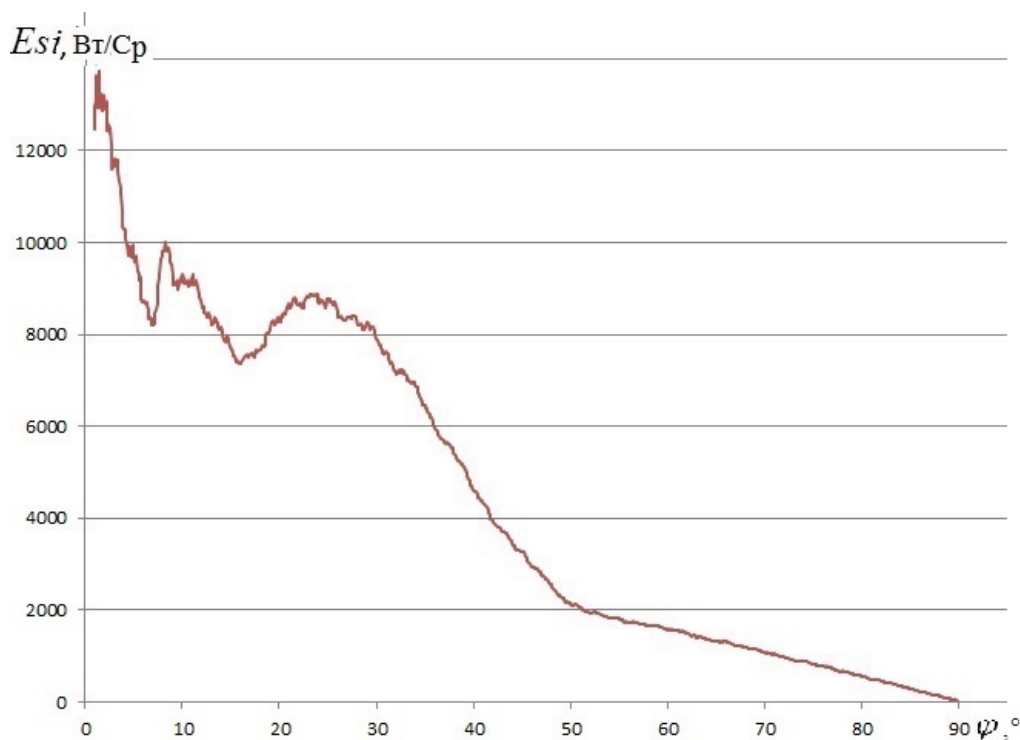


Рис. 2. Индикатриса излучения СУ АЛ-31Ф

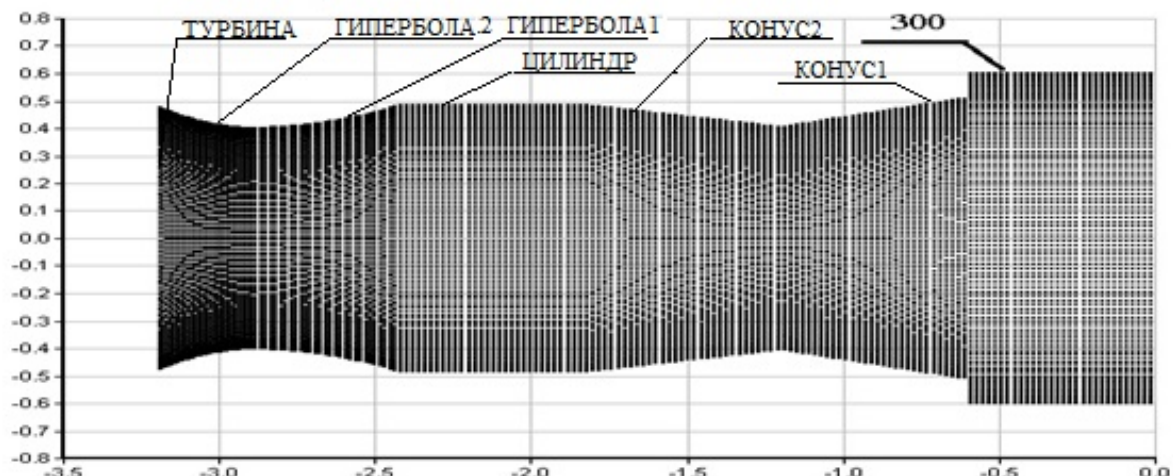


Рис. 3. Схематическое изображение сопла и экрана

Проведены расчёты для экранирующего элемента с различным радиусом r , длиной h и расстоянием до плоскости среза сопла H . Результаты приведены на рис. 4.

Общая эффективность возрастает незначительно при увеличении размера экрана, начиная от длины 0,85 м. При использовании специального экранного устройства наблюдается значительное (до 98%) снижение ИК-излучения в радиальном направлении. При этом уровень излучения вдоль оси возрастает. Таким образом, видимость ЛА для

фотоприёмников, чувствительных к излучению в области ИК спектра, сводится к небольшому углу вдоль оси симметрии СУ. Учитывая, что для наземной ИК-аппаратуры наибольшее значение имеет излучение в радиальном направлении, использование устройства может быть плодотворным. Оценка эффективности применения экранов приведена в табл. 2. При этом геометрия экрана (длина и диаметр) являются важными параметрами, определяющими его эффективность.

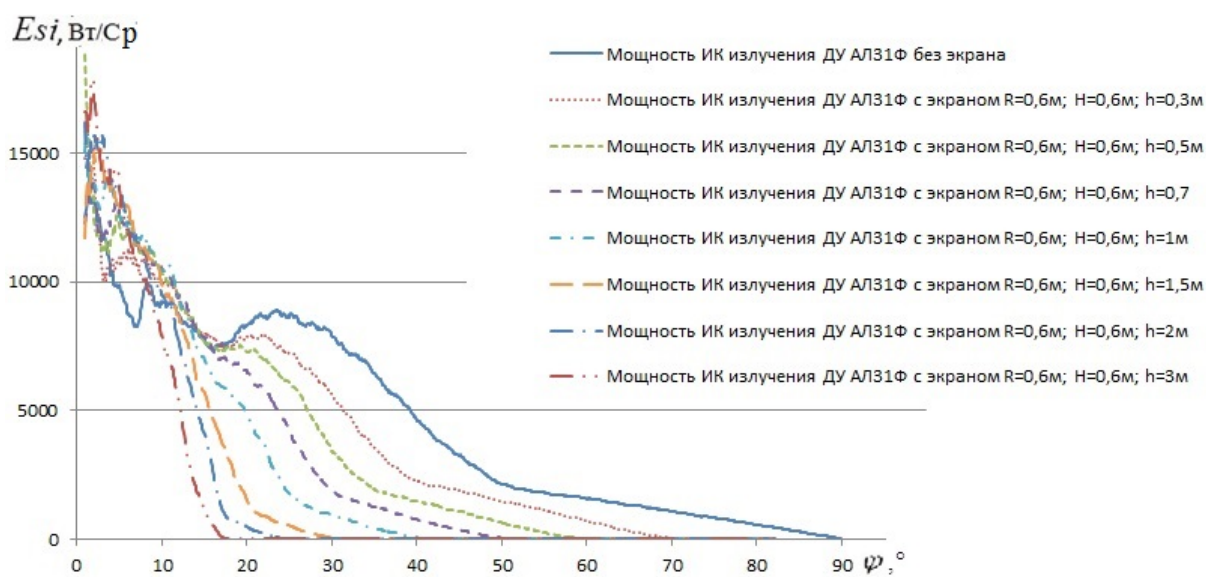


Рис. 4. Индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф с установленным экранирующим элементом

Таблица 2. Сравнительная эффективность экранов, %

Диапазон углов, градусы	Длина экрана, м						
	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3
1-10	-11,14	-19,45	-16,64	-23,54	-22,18	-25,30	-20,88
10-20	-1,96	0,21	2,50	12,90	35,43	54,39	77,38
20-30	18,00	33,97	53,65	75,94	94,23	98,92	99,59
30-40	44,36	67,15	80,53	93,60	99,49	99,49	99,48
40-50	40,45	67,54	89,95	99,10	99,11	99,10	99,10
50-60	40,56	86,58	98,76	98,77	98,77	98,76	98,78
60-70	77,36	98,77	98,77	98,77	98,77	98,79	98,78
70-80	98,74	98,76	98,75	98,78	98,76	98,77	98,73
80-90	98,76	98,80	98,77	98,78	98,80	98,73	98,79
Среднее значение эффективности, %	45,01	59,15	67,23	72,57	77,91	80,18	83,30



Рис. 5. Индикатриса излучения центрального эллипсоидного тела СУ АЛ-31Ф

Сравнение результатов прямого (без учёта переотражения) и полного (с учётом переотражения) расчёта излучения потока лучистой энергии элементов центрального эллипсоидного тела СУ ЛА в заднюю собирающую полусферу позволяет сделать вывод о том, что доля отражённого излучения составляет 11-17% от общего (рис.5).

На основе описанной математической модели разработан пакет прикладных программ, написанный на языке С++, позволяющий проводить численные эксперименты. Проведено моделирование СУ АЛ-31Ф и произведён расчёт ИК-излучения. Предложено экранирующее устройство, снижающее ИК-излучение, и проведён анализ её эффективности. Предложенное устройство позволило снизить уровень ИК-излучения более чем на 90% в некоторых значениях телесного угла задней полусферы. Рассчитана индикатриса прямого инфракрасного излучения элементов турбины, кока и реактивного сопла СУ АЛ-31Ф в собирающую полусферу. Рассчитана индикатриса ИК-излучения элементов турбины и внутренней поверхности сопла с учётом переотражения в заднюю полусферу сопла СУ ЛА. Разработанный алгоритм использует вероятностный подход, что приближает смоделированный процесс испускания и отражения луча к реальному физическому процессу. Его достоинством является и то, что он применим как к высокодетализированному, так и грубому моделированию двигателя.

Библиографический список

1. Гавриленков В.А., Скорик В.И., Трембач В.В. К расчету кривой силы света параболоидного отражателя // Светотехника. 1965. № 3. С. 23-25.
2. Суржиков С.Т. Рациональный нагрев спускаемого космического аппарата в лётном эксперименте FIRE-II // Сб. науч. тр. IX междунар. симпозиума по радиационной плазмодинамике. М.: Инженер, 2012. С. 48-52.
3. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю. Математическое моделирование пространственного распределения энергии сложного излучателя // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 3. С. 76-85.
4. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. Расчёт пространственного распределения энергии сложного излучателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2013. №1 (39). С. 214-221.
5. Суринов Ю.А. Интегральные уравнения теории переноса излучения в анизотропно рассеивающей среде (для обобщенной постановки пространственной задачи) // Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3, № 3. С. 122-131.
6. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. Проблемы снижения тепловой заметности двигателей ЛА // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 223-227.
7. Леонтьев М.К. Атлас деталей и узлов двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф. М: ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ имени А. Льюльки, 2008. 20 с.
8. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. Газодинамический и тепловой расчёт работы дозвукового сопла малогабаритного ТРД на базе турбостартера ТС-21 // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 228-233.

Информация об авторе

Филиппов Глеб Сергеевич, аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: Filippov.Gleb@gmail.com. Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей, малогабаритные авиационные двигатели, математическое моделирование.

MATHEMATIC SIMULATION OF AL-31F POWERPLANT RADIATION IN THE IR RANGE

© 2014 G. S. Filippov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

The paper is devoted to the modeling of aircraft power plant radiation. The object of investigation is the AL-31F aircraft afterburning turbojet bypass engine. The results of research dealing with the calculation of spatial distribution of radiation from complex radiators are presented. A complex method of calculating the infrared radiation based on mathematic simulation of radiant energy spatial distribution is proposed. An algorithm using the probabilistic Monte Carlo method is developed, which makes the modeled process of the beam emission and reflection similar to the physical one. A new method of calculating the indicator function in an absorbing medium from complex radiators is used. Calculations of temperature distribution inside the nozzle

and modeling of the power plant geometry are performed. Spatial distribution of infrared radiation is determined on the basis of the computations made. A device for reducing the intensity of radiation over a wide angle range is developed, the analysis of its efficiency is carried out. The device proposed makes it possible to reduce the design level of infrared radiation by more than 90% in the range of the solid angle of the rear hemisphere. The results of calculating the direct (without reflections of radiation inside the nozzle) and complete (including reflections) radiation from the central ellipsoidal body are presented. The results of the comparison of these calculations are also presented.

Monte Carlo method, distribution of infrared radiation, heat radiation, aircraft radiation.

References

1. Gavrilentov V.A., Skorik V.I., Trembach V.V. Calculation of the paraboloid reflector light intensity curve // *Svetotekhnika*. 1965. No 3, P. 23-25. (In Russ.)
2. Surzhikov S.T. Ratsional'nyy nagrev spuskaemogo kosmicheskogo apparata v letnom eksperimente FIRE-II // *Sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunarodnogo simpoziuma po radiatsionnoy plazmodinamike*. Moscow: Inzhener Publ., 2012. P. 48-52. (In Russ.)
3. Filippov G.S., Nikolaenko V.S., Jaschenko B.J. Calculation of energy spatial distribution for complicated emitter // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2013. V. 20, no. 3. P. 76-85. (In Russ.)
4. Filippov G.S., Nikolaenko V.S., Jaschenko B.J., Evdokimov I.E. Calculation of spatial distribution of energy of a complex radiator // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 1 (39). P. 214-221. (In Russ.)
5. Surinov Y.A. Integral equations of the theory of radiation transfer in anisotropic scattering medium (for the generalized formulation of the spatial problem) // *Teplofizika vyisokih temperatur*. 1965. V. 3, no. 3. P. 122–131. (In Russ.)
6. Filippov G.S., Evdokimov I.E., Yakovlev A.A. Thermal signature reduction problems of aircraft engines // *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012. V. 6. P. 223-227. (In Russ.)
7. Leontev M.K. Atlas detaley i uzlov dvuhkonturnogo turboreaktivnogo dvigatelya AL-31F [Atlas of parts and assemblies of the AL-31F turbojet engine]. Moscow: NPO Saturn Publ., 2008. 20 p.
8. Filippov G.S., Evdokimov I.E., Yakovlev A.A. TC-21 turbine-starter-based gas-dynamic and thermal calculation of subsonic small-size turbojet engine nozzle operation // *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012. No. 6. P. 228-233. (In Russ.)

About the author

Filippov Gleb S., postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.

E-mail: Filippov.Gleb@gmail.com. Area of Research: infrared radiation, engine heat signature, small-sized aircraft engines, mathematic simulation.

УДК 534.134

УСТРАНЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ВИБРОНАГРУЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

© 2014 К. Ю. Шабанов¹, А. Н. Крючков², М. А. Ермилов², М. В. Баляба³¹ОАО «Газпром Трансгаз Самара»²Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)³Институт акустики машин при СГАУ, г. Самара

В статье приведено исследование режимов резонансного взаимодействия высокоскоростного потока газа, выходящего из дозирующих сечений регуляторов давления, с его элементами. Показано, что такое взаимодействие приводит к существенному увеличению шума клапана за счёт возникновения тональной составляющей спектра колебательной энергии, проявляющейся на частотных характеристиках пульсаций давления в трубопроводе, вибрации выходного фланца регулятора, а также внешнего шума клапана. Приведены результаты исследования условий возникновения резонансного взаимодействия потока газа с элементами конструкции регулятора, в том числе со стойками – пилонами центрального обтекателя. Показано, что с увеличением выходной скорости потока выше определённого значения (около 40 м/с) возникают дискретные составляющие спектра пульсаций давления. Представлены результаты экспериментального анализа элементов регулятора давления, показывающие практическое совпадение частот дискретных составляющих спектра пульсаций потока и собственных колебаний элементов конструкции. Модальный анализ собственных колебаний элементов регулятора проводится методом простукивания. Предложены мероприятия по устранению резонансного взаимодействия выходного потока со стойками – пилонами, заключающиеся в установке специальных рассекающих поток конструкций в виде перфорированных цилиндрических втулок.

Газотранспортные системы, резонансное взаимодействие, регулятор давления, пульсации потока, шум, клапан, собственные частоты и формы колебаний, вихревые струи, флаттер.

В газотранспортной системе установлено значительное количество клапанов, работающих при высоких перепадах давления [1]. В частности, на газораспределительных станциях (ГРС) используются регуляторы давления газа, понижающие его давление с 5...7 МПа (реализуемое в магистральном трубопроводе) до 0,5...1 МПа в трубопроводных сетях конкретных потребителей. Авторским коллективом установлено, что помимо широкополосного шума газодинамического происхождения, интенсивность которого может достигать 100 дБА и выше, реализуются также тональные шумы для класса широко применяемых регуляторов типа РДУ 50 и РДУ 80. Причиной этого является интенсивное взаимодействие высокоскоростной струи газа, выходящей из дозирующего кольцевого сечения, с элементами его выходного тракта. Особенностью вышеуказанных агрегатов РДУ является

наличие в данном тракте центрального обтекаемого тела, на котором закрепляется дозирующий и запорный элемент агрегата (рис. 1, поз. 10). При такой конструкции регулятора интенсивная струя газа, выходящая из кольцевого дозирующего сечения, взаимодействует с поддерживаемыми центральное тело стойками-пилонами (рис. 1, поз. 12), возбуждая вибрации последних. При этом возникает виброакустическое взаимодействие вихревых структур струи и вибрирующих стоек-пилонов, известное в авиации как флаттер. Резонансные явления таких виброакустических процессов наблюдаются при совпадении характерной (струхалевой) частоты срыва вихрей струи с собственными частотами колебаний пилонов. Для агрегатов РДУ 50 и РДУ 80 такие частоты находятся в диапазоне 3100...6300 Гц.

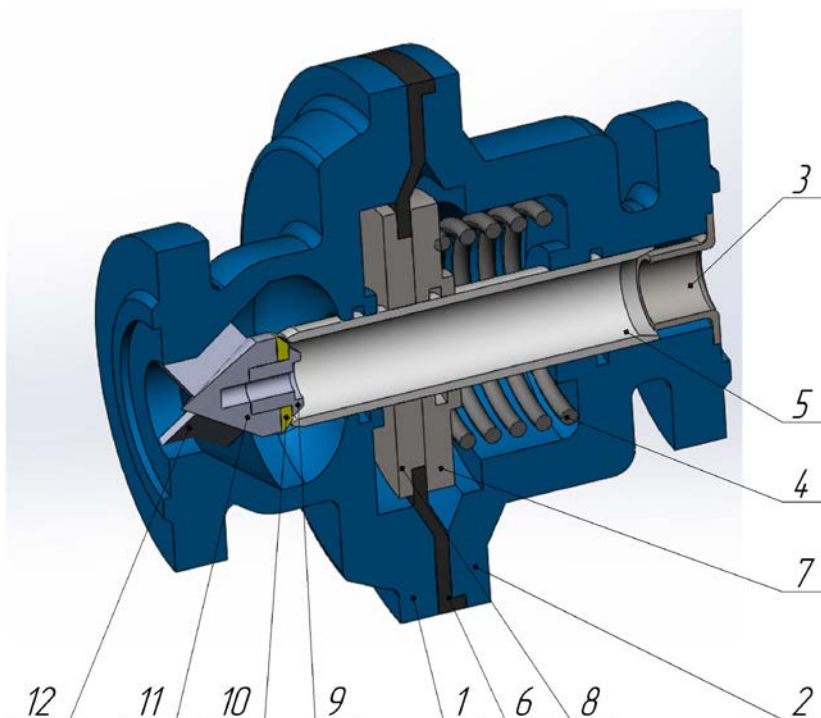


Рис. 1. Схема регулятора давления газа РДУ-80:
 1 – выходной фланец; 2 – входной фланец; 3 – кожух; 4 – пружина; 5 – затвор;
 6 – мембрана; 7, 8 – держатель мембраны; 9 – прижим седла; 10 – седло;
 11 – выходной направляющий конус; 12 – пилон

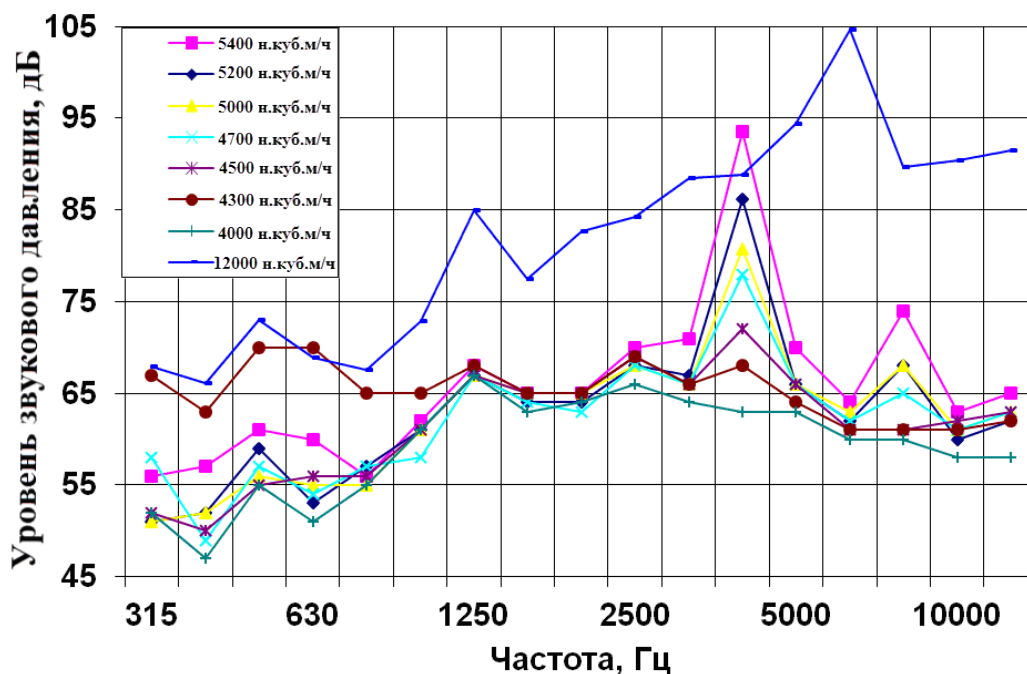


Рис. 2. Спектры уровня звукового давления в редуцирующей камере ГРС-64 при плавном снижении расхода (графики 4000-5400 - расход плавно снижается от 5400 до 4000 н.куб.м/ч)

В качестве примера на рис. 2 показаны спектры звукового давления в редуцирующем зале ГРС-64 ОАО «Газпром Трансгаз Самара» [2,3]. Можно заметить, что в третьоктавной полосе 4000 Гц наблюдается указанный резонансный режим, реализующийся при расходах газа свыше 4000 н.куб.м/ч. Это объясняется, по-видимому, возбуждением автоколебаний пилонов (в том, что данное явление носит автоколебательный характер, нет никакого сомнения, т.к. в трубопроводной системе нет ни одного источника, возбуждающего подобные колебания). Из рис. 2 также видно, что при понижении расхода газа с 5400 до 4000 н.куб.м/ч данные автоколебательные процессы полностью прекращаются. Можно также заметить, что резонансные режимы возбуждаются и на высших формах колебаний элементов конструкции.

Наличие рассматриваемых резонансных режимов клапанов приводит к значительному увеличению вибронагруженности как самих клапанов, так и трубопроводной арматуры. На рис. 3 показан участок газопровода ГРС-64, обследованного как контактными вибродатчиками, так и бесконтактным лазерным вибромет-

ром. Результаты исследований показали, что наличие резонансных режимов повышает виброскорость стенки трубы в 15 раз, что значительно увеличивает вибрационные нагрузки на трубопроводную арматуру (рис. 4).

Отличительной особенностью резонансных режимов клапанов РДУ является то, что при развитых автоколебательных процессах гасители пульсаций давления (ГПД), разработанные без их учёта, оказывают незначительное влияние на дискретные составляющие шума. Это хорошо видно на рис. 2. Из него следует, что установленный ГПД не обеспечивает устранение дискретной звуковой составляющей в полосе 4 кГц, причём наличие такой составляющей увеличивает шум в зале редуцирования на 20...30 дБА, что является недопустимым. С другой стороны, из рис. 5 следует значительная эффективность гасителя пульсаций в окрестности резонансной частоты. Поэтому необходимо при проектировании ГПД производить его газодинамический расчёт таким образом, чтобы направление и вихревая частота дросселируемого потока не совпадали с собственными частотами элементов конструкции регулятора.

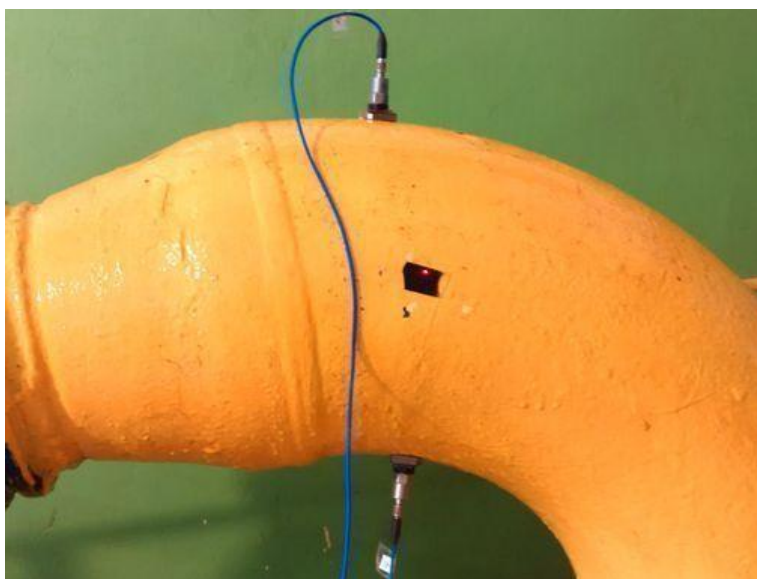


Рис. 3. Измерение виброускорения стенки трубопровода после РДУ-80 на ГРС-64

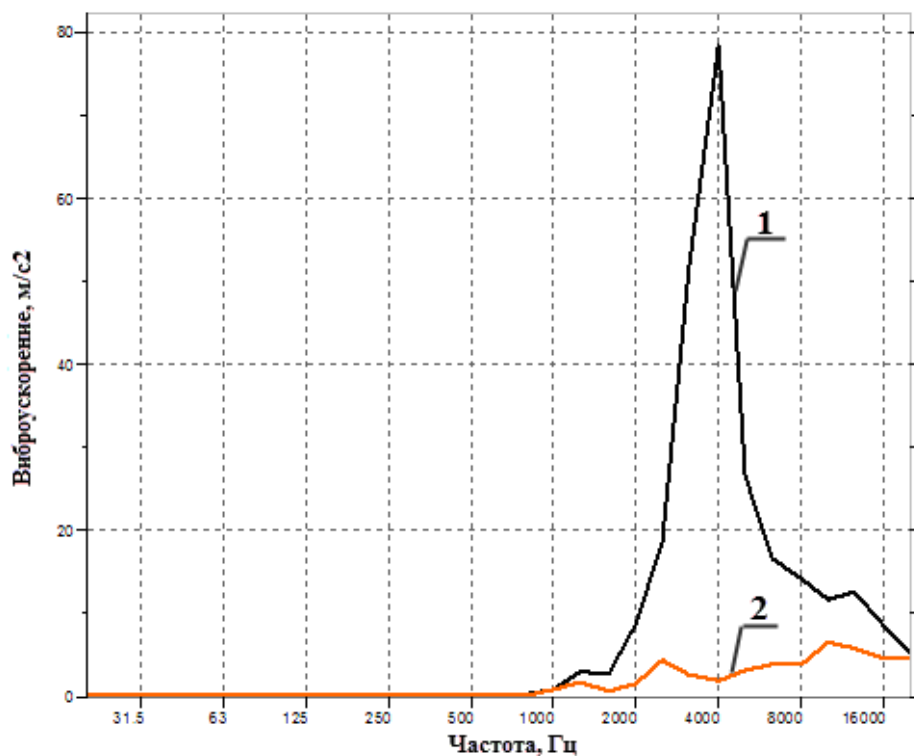


Рис. 4. Спектр виброускорения стенки трубопровода после РДУ-80 на ГРС-64 (1 – без ГПД; 2 – на выходе РДУ-80 установлен ГПД)

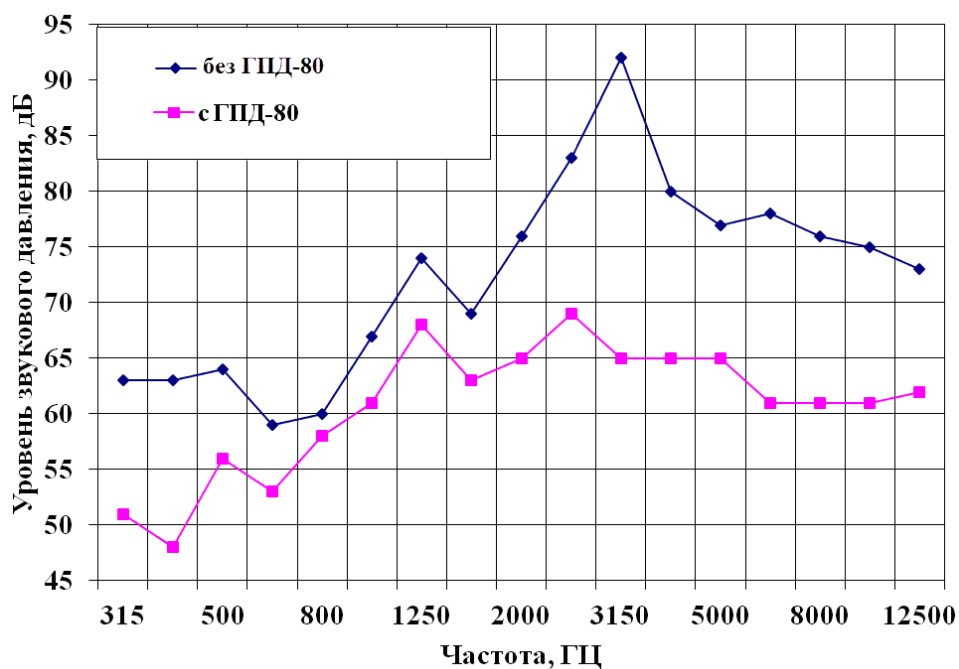


Рис. 5. Уровни звукового давления в третьоктавных полосах без ГПД-80 и с установкой ГПД-80 при расходе 4000 н.куб.м/ч

На рис. 5 показаны уровни звукового давления без ГПД-80 и с ГПД-80 при расходе 4000 н.куб.м/ч. Можно заметить, что ГПД эффективно (на 27 дБ) подавил дискретную составляющую спектра 3150 Гц, что связано, по-видимому, с низкой её энергетикой, обусловленной относительно малой скоростью потока газа [4].

Так как при отсутствии резонансных режимов разработанные специалистами

СГАУ гасители пульсаций давления обеспечивают выполнение санитарных норм (рис. 6) по шуму (чего нельзя сказать при наличии резонансных режимов), то важнейшей задачей акустической доводки гасителя является устранение автоколебательных процессов в системе «Регулятор-Гаситель-Трубопровод».

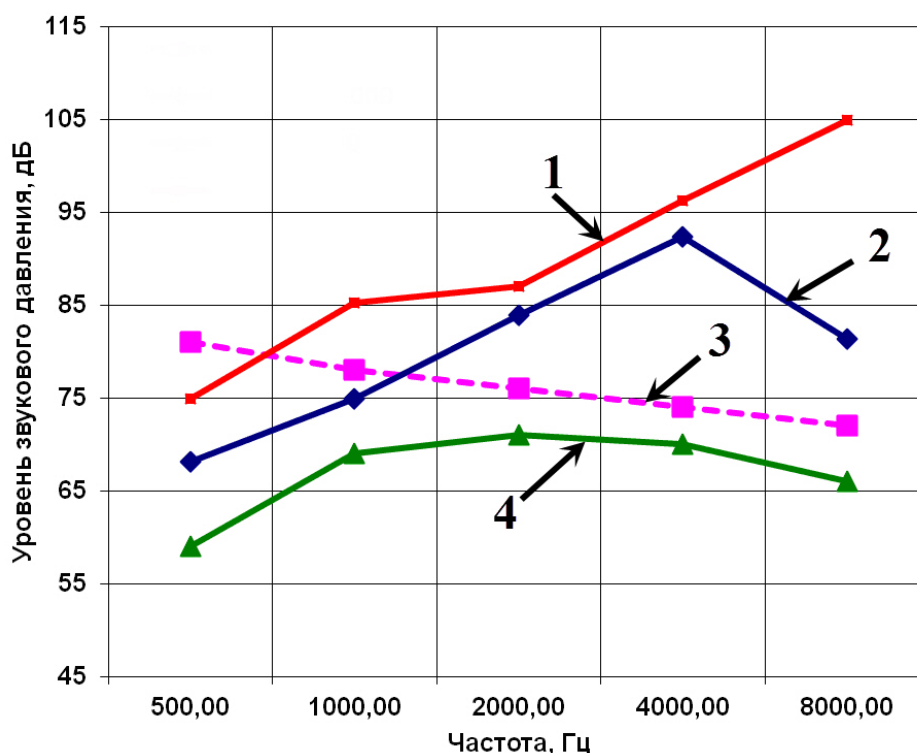


Рис. 6. Уровни звукового давления в октавных полосах частот:

1 – без ГПД-80 расход равен 10000 н.куб.м/ч; 2 – без ГПД-80 расход равен 4000 н.куб.м/ч; 3 – установленная норма шума в октавных полосах; 4 – с ГПД-80 расход равен 4000 н.куб.м/ч

Исследование резонансных режимов работы РДУ-50 производилось на стендовой установке СГАУ с имитацией реальных рабочих режимов работы агрегатов. Целью исследований являлось определение границ диапазонов резонансных режимов агрегата. Режим работы регулятора определяется тремя основными параметрами: входным и выходным давлением газа и массовым расходом. Указанные параметры определяют фактическую скорость и направление потока газа, набегающего на пилоны регулятора. В процессе

стендовых исследований было воспроизведено более 30 режимов работы РДУ 50. По результатам исследований построены области реализации резонансных режимов (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что при средней скорости потока газа на выходном срезе регулятора до 41 м/с не возникает тональной составляющей виброакустических параметров газа: пульсаций газа, вибраций и шума.

При увеличении скорости свыше 41 м/с возникают резонансные режимы агре-

гата, сопровождающиеся возникновением значительных тональных составляющих параметров.

Отдельной кривой показана зависимость критерия Струхала от скорости потока, которая вычисляется по формуле

$St = \frac{f \cdot \delta}{v}$ (за характерный размер δ берём толщину пилона РДУ). Она показывает, что при числах Струхала менее 0,4 возникают резонансные режимы [5].

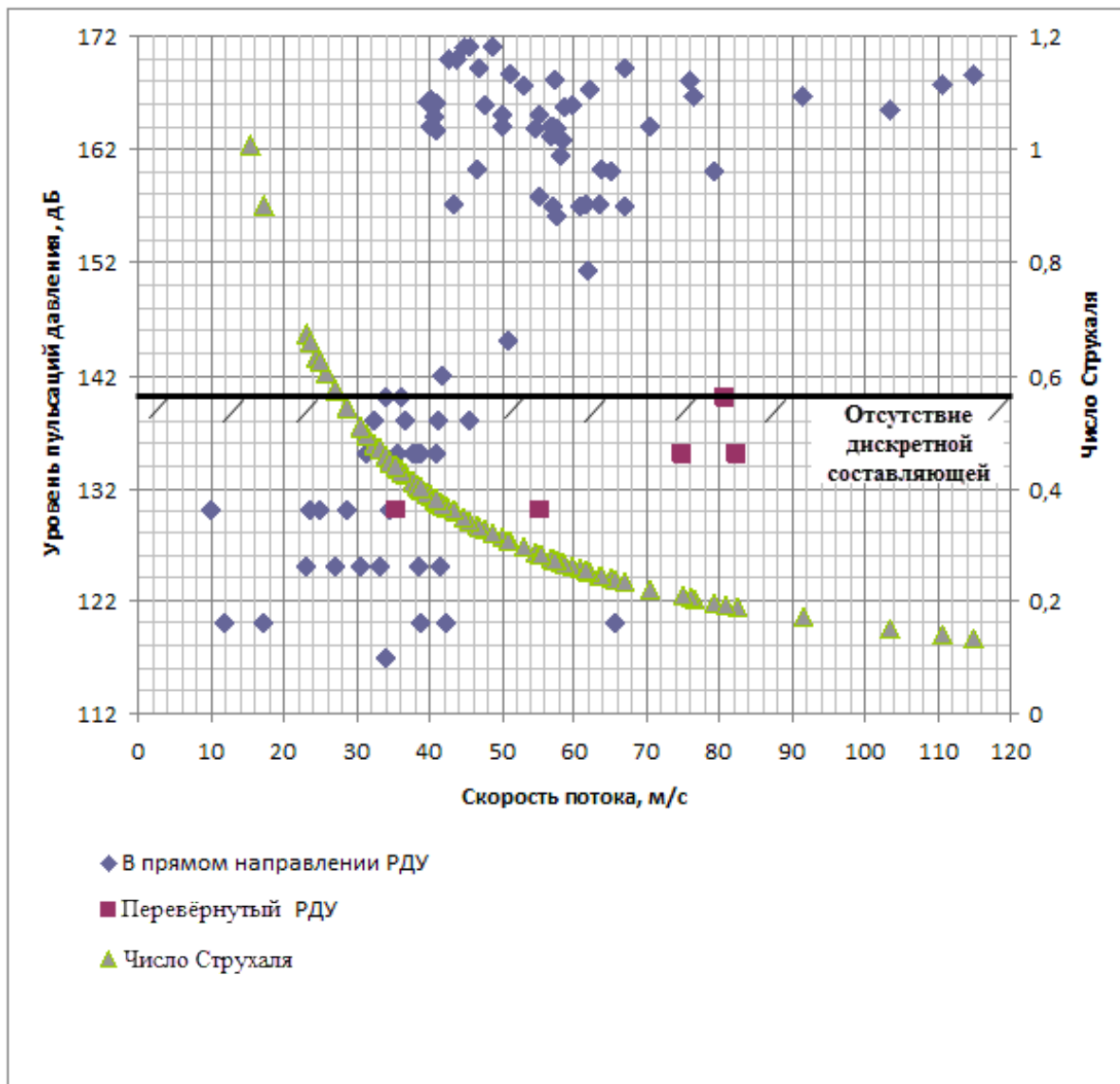


Рис. 7. Зависимость уровня пульсаций давления от скорости на выходе регулятора

Для подтверждения предположения о возбуждении пилонов были проведены мероприятия по обратному и прямому включению регулятора. Они показали отсутствие резонансов агрегата при его обратном включении (рис. 8).

Для изменения направления струи, обтекающей пилоны, установлены пористые элементы, преобразующие структуру

струи и устраняющие резонансы. Результаты показаны на рис. 9.

В целях более детального исследования выходного потока агрегата проведено его численное моделирование в программе ANSYS FLUENT 3D. На рис. 10 показано распределение осевой скорости потока газа по каналу регулятора давления газа.

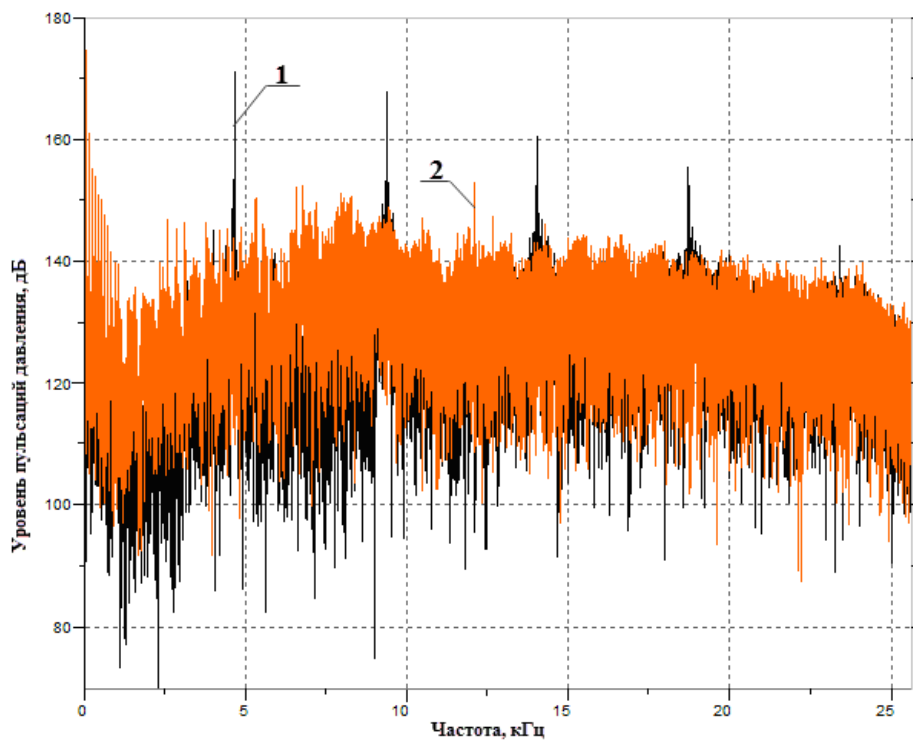


Рис. 8. Пульсации давления на выходе РДУ-50, полученные при стендовых испытаниях в СГАУ (1 – рабочее положение РДУ; 2 – РДУ развёрнут входом на выход),
 $P_{вх}=40$ атм., $P_{вых}=4$ атм., $Q=970$ н.куб.м/ч

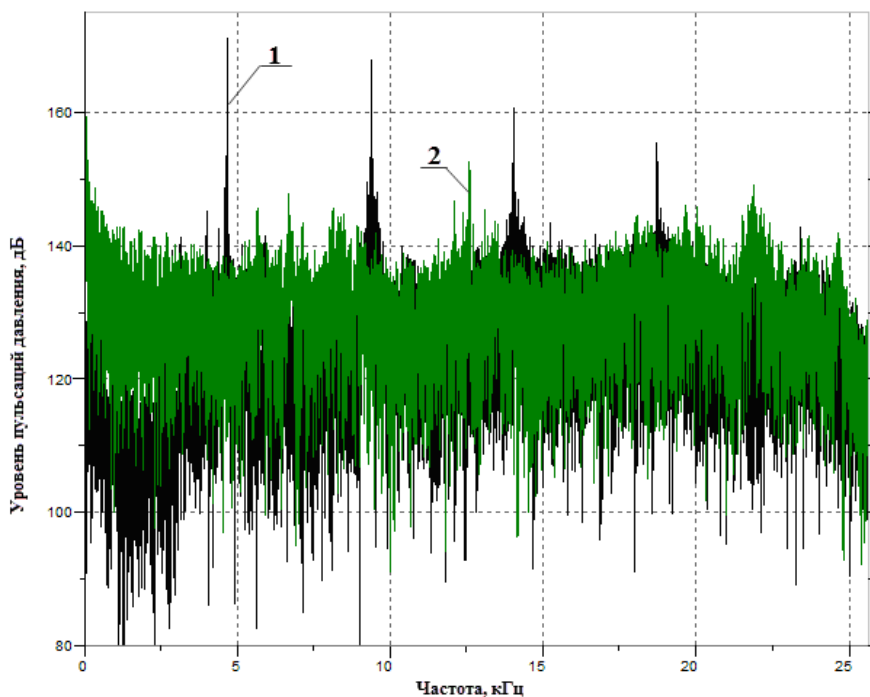


Рис. 9. Пульсации давления на выходе РДУ-50, полученные при стендовых испытаниях в СГАУ (1 – пилоны открыты; 2 – пилоны покрыты пористым материалом),
 $P_{вх}=40$ атм., $P_{вых}=4$ атм., $Q=970$ н.куб.м/ч

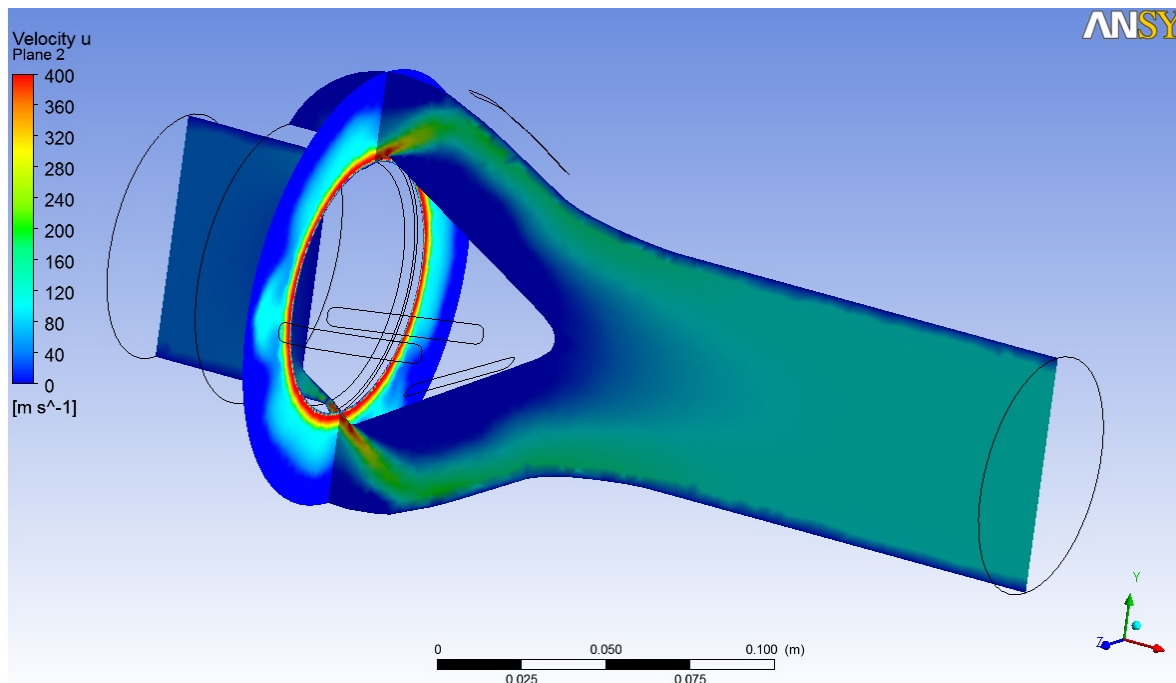


Рис. 10. Скорости потока газа на выходе клапана регулятора давления

Проведён модальный анализ отдельных частей регулятора методом простукивания (рис. 11-14), и определены собственные частоты его элементов.

1. Прижимная пружина РДУ-50. Частота 2342 Гц.

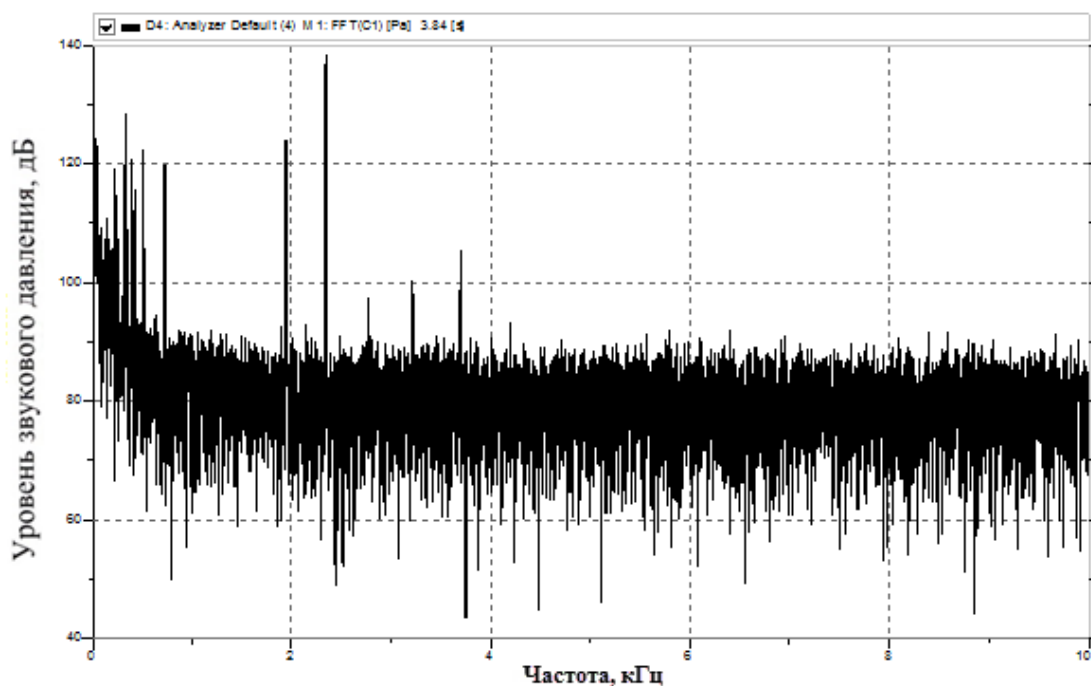


Рис. 11. Спектр звукового давления, полученный при простукивании прижимной пружины РДУ-50

2. Шток РДУ-50. Частота 4543 Гц.

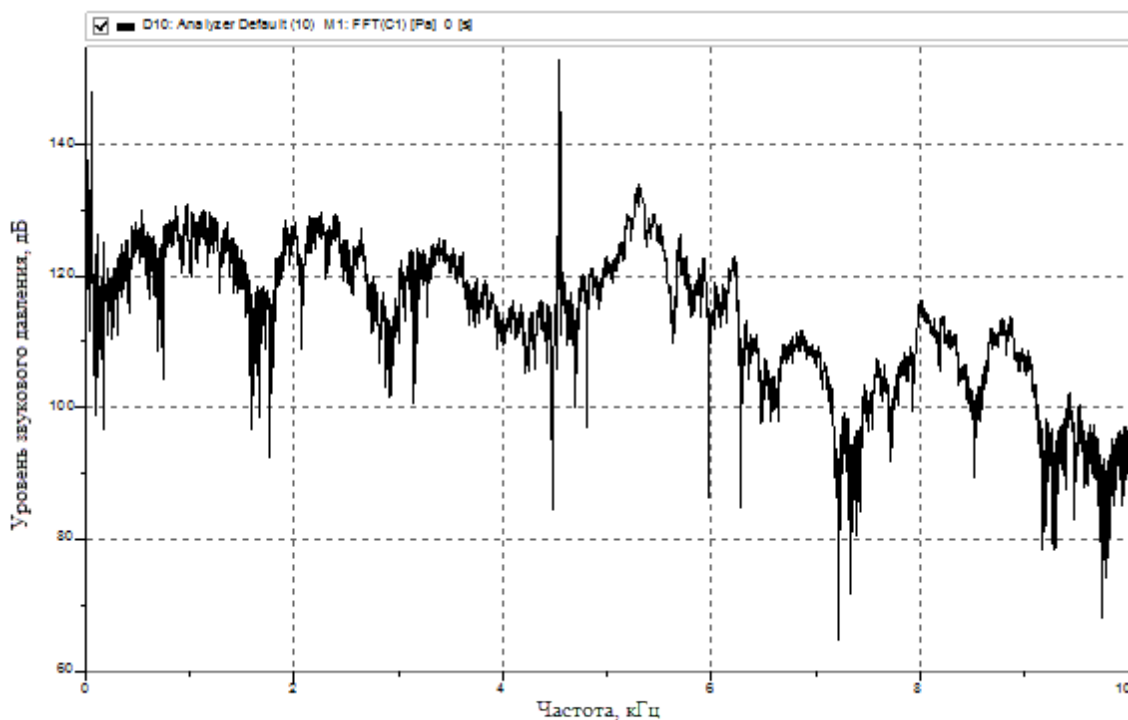


Рис. 12. Спектр звукового давления, полученный при простукивании штока РДУ-50

3. Выходной фланец РДУ-50. Частота 3544 Гц (2442, 4068 Гц).

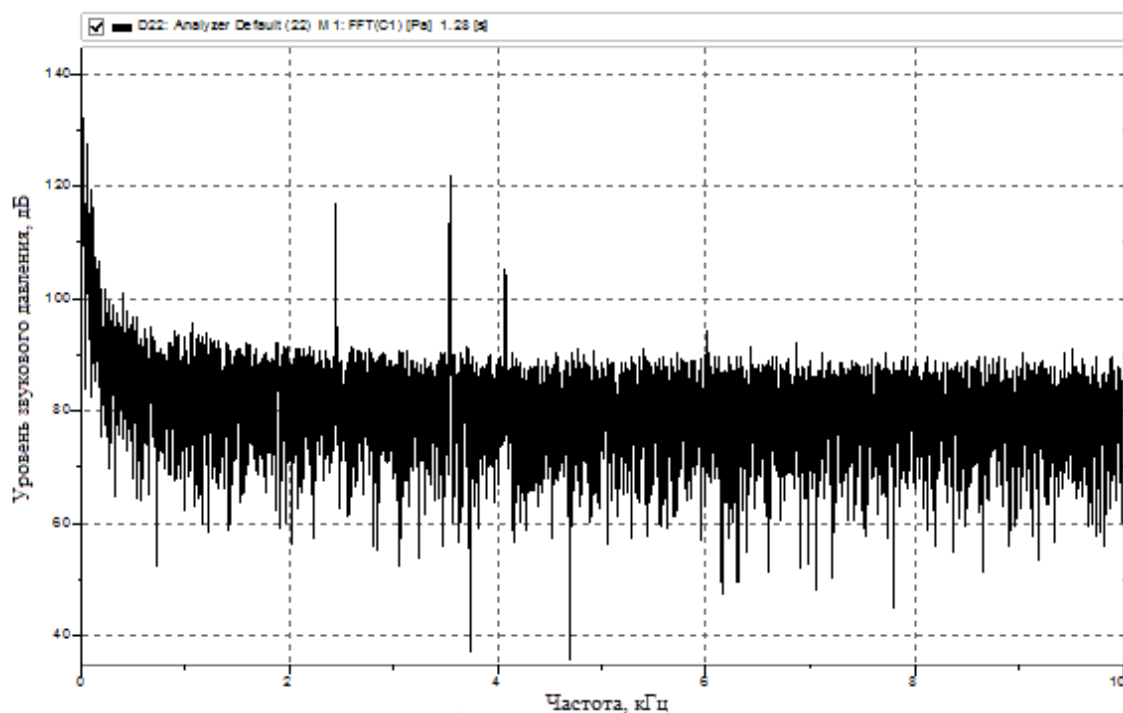


Рис. 13. Спектр звукового давления, полученный при простукивании выходного фланца РДУ-50

4. Входной фланец РДУ-50. Частота 2713 Гц (3699 Гц).

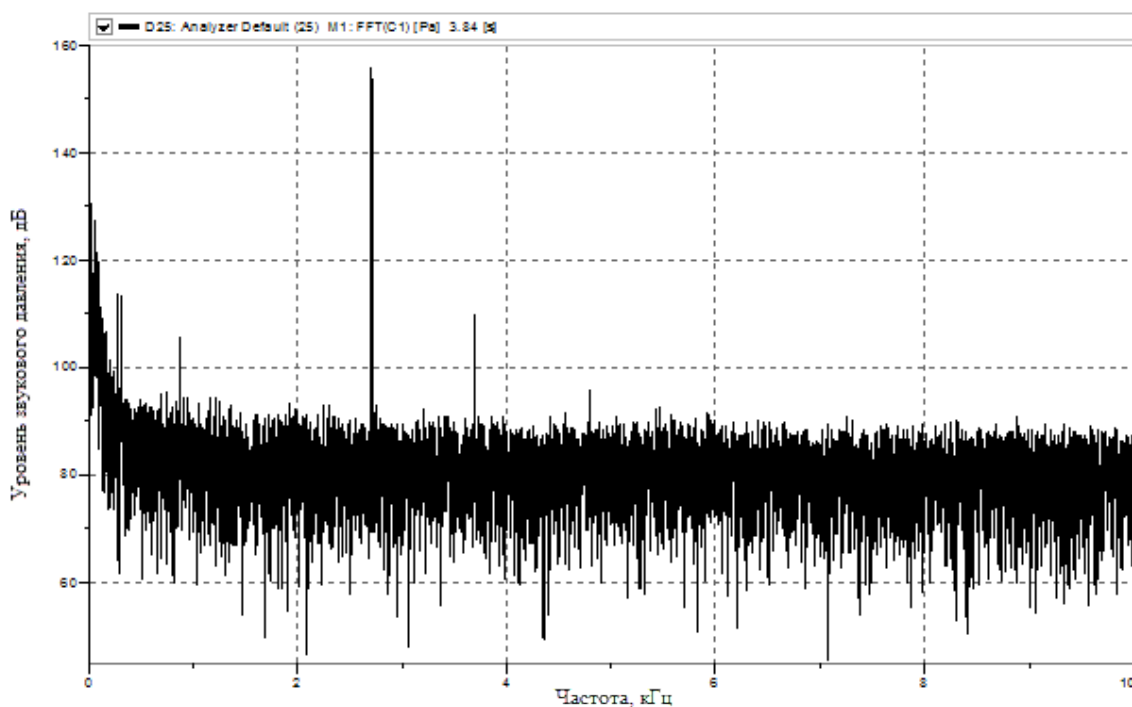


Рис. 14. Спектр звукового давления, полученный при простукивании входного фланца РДУ-50

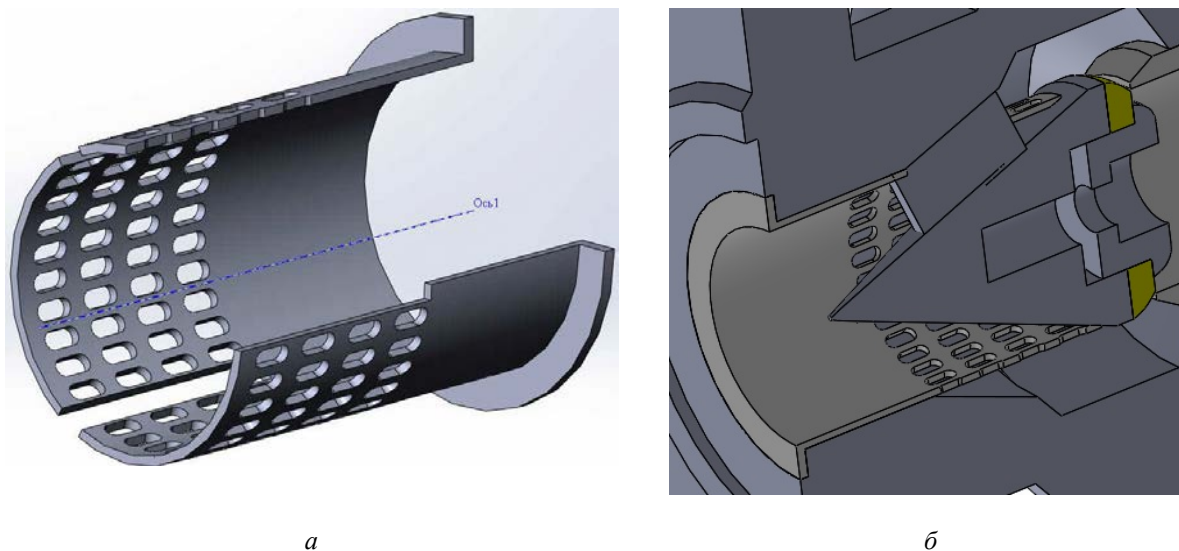


Рис. 15. Перфорированная втулка (а) и её расположение в РДУ-50 (б)

Другим важным мероприятием по устранению резонансных режимов является установка в выходной канал регулятора перфорированной втулки (рис. 15), которая позволяет разбивать крупновихревые структуры и снижать их гидродинамическое воздействие на пилоны.

Заключение

В результате проведённых исследований выявлен механизм возникновения резонансов регуляторов и предложены мероприятия по их предотвращению:

1. Снижение выходной скорости потока газа за счёт увеличения перепада давления на гасителе пульсаций давления.

2. Изменение структуры потока в выходном канале за счёт использования перфорированной втулки или профиля седла.

Библиографический список

1. Арзуманов Э.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

2. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

3. Иоффе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике. М.: Связь, 1979. 312 с.

4. ANSI/ISA - 75.17-1989. Control Valve Aerodynamic Noise Prediction, ISBN 1-55617-207-9. 1989. 32 p.

5. Шорин В.П. Разработка методов физического моделирования глушителей шума сверхзвуковых пульсирующих струй. Самара: СГАУ, 2008. 72 с.

Информация об авторах

Шабанов Константин Юрьевич, начальник технического отдела, ОАО «Газпром Трансгаз Самара». E-mail: K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru.

Область научных интересов: газодинамические процессы в трубопроводах газораспределительных станций.

Крючков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kan@ssau.ru. Область научных интересов: автоматизация систем управления, динамика и виброакустика технических систем.

Ермилов Михаил Анатольевич, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: emasamara@gmail.com. Область научных интересов: гидравлика, пневматика.

Баляба Максим Владимирович, инженер, Институт акустики машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bmw-surgut@yandex.ru. Область научных интересов: динамика и виброакустика технических систем.

ELIMINATION OF GAS DYNAMIC RESONANCE MODES OF VIBRATION LOADS OF GAS DISTRIBUTION STATION PIPELINE FITTING

© 2014 K. U. Shabanov¹, A. N. Kryuchkov², M. A. Ermilov², M. V. Balyaba³

¹Gazprom Transgas Samara plc, Samara, Russian Federation

²Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

³Machine Acoustics Institute, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article contains a study of the modes of resonance interaction of a high-speed gas flow exiting from the metering sections of pressure regulators with their elements. It is shown that the interaction leads to a signifi-

cant increase of the valve noise due to the tone component of the spectrum of vibration energy which occurs at the frequency characteristics of pressure fluctuations in the pipeline, the vibration of the controller output flange, as well as the external valve noise. The results of analyzing the prerequisites for resonant interaction of the gas flow with the regulator structural elements including the pylons of the central fairing are presented in the paper. It is shown that an increase in the output flow rate above a certain value (about 40 m / s) gives rise to discrete components of the spectrum of pressure fluctuations. The results of experimental analysis of the pressure regulator elements showing practical coincidence of the frequencies of discrete components of the flow pulsation spectrum and free oscillations of construction elements are also presented. Modal analysis of the natural oscillations of regulator elements is performed by tapping. Measures to remove resonant interaction of the output flow with the pylons that consist in installing special flow-splitting structures - perforated cylindrical sleeves are proposed. Other measures to eliminate the resonant interaction under consideration are also possible.

Gas transportation system, resonance interaction, pressure regulator, flow pulsations, noise, valve, natural frequencies and mode shapes, flux of vorticity, flutter.

References

1. Arzumanov E.S. *Gidravlicheskie reguliruyushie organy system avtomaticheskogo upravleniya* [Hydraulic regulating elements of automatic control systems]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1985. 256 p.
2. Udin E.Ya. *Borba s shumom na proizvodstve* [Noise control in manufacture]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1985. 400 p.
3. Joffe V.K., Korol'kov V.G., Sapozhkov M.A. *Spravochnik po akustike* [Reference book on acoustics]. Moscow: Svyaz' Publ., 1979. 312 p.
4. ANSI/ISA-75.17-1989 *Control Valve Aerodynamic Noise Prediction*, ISBN 1-55617-207-9. 1989. 32 p.
5. Shorin V.P. *Razrabotka metodov fizicheskogo modelirovaniya glushiteley shuma sverkhzvukovyh pulsirujushih struy* [Development of methods of physical modeling of supersonic pulse jet noise dampers]. Samara: Samara St. Aerosp. Univ. Publ., 2008. 72 p.

About the authors

Shabanov Konstantin Yurievich, Chief Technical Officer, Gazprom Transgas Samara plc, Russian Federation. E-mail: K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru. Area of research: gas-dynamic processes in pipelines of gas distribution stations.

Kryuchkov Alexander Nicolayevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: kan@ssau.ru. Area of research: computer-aided control systems, dynamics and vibroacoustics of technical systems.

Ermilov Mikhail Anatolyevich, post-graduate student, Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: emasamara@gmail.com. Area of research: hydraulics, pneumatics.

Balyaba Maxim Vladimirovich, engineer, Machine Acoustics Institute, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: bmw-surgut@yandex.ru. Area of research: dynamics and vibroacoustics of technical systems.

УДК 681.52

ПЕРЕСТРОЙКА ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ШАГЕ ДИСКРЕТНОСТИ

© 2014 В. Д. Белоногов

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

При реализации объёмного набора задач цифрового управления, фильтрации и контроля на процессорах с ограниченными вычислительными ресурсами в процессе работы может возникнуть необходимость изменения периода дискретности T_0 задачи управления. Это может быть вызвано, например, необходимостью решения в определённые моменты более важных задач, занимающих ресурсы вычислителя. В этом случае задачи управления будут решаться с увеличенным периодом дискретности $T_0 \cdot N$, что при постоянных параметрах цифрового регулятора приведёт к ухудшению динамики системы, а при существенном изменении периода – даже к потере устойчивости замкнутой цифровой системы. Для восстановления динамических свойств контура необходима перестройка (оперативный пересчёт) параметров регулятора в функции от параметра N , определяющего кратность изменения периода квантования. Данная перестройка алгоритмов должна осуществляться автоматически в процессе функционирования цифровой системы и, вследствие этого, алгоритмы перестройки должны иметь достаточно простой вид.

В статье рассматриваются вопросы перестройки цифровых алгоритмов управления (ЦАУ) при значительном изменении периода дискретности задачи управления. Приводятся критерии близости характеристик цифрового регулятора при изменённом и исходном шаге дискретности. На основании данных критериев для простейших законов управления получены явные формулы пересчёта констант цифрового регулятора, а для общего случая сформирована методика перестройки констант управления.

Цифровое управление, период дискретности, перестройка параметров, z- передаточные функции, реальная частота, статика системы, частотная характеристика, решётчатая весовая функция.

Постановка задачи

Рассмотрим упрощённую структурную схему локального канала цифровой системы управления непрерывным объектом (рис.1) [1].

Основными элементами контура управления являются непрерывный объект управления (ОУ), описываемый передаточной функцией $W_0(s)$; исполнительные устройства (ИУ) – $W_p(s)$; датчики – $W_d(s)$; преобразователи аналог-цифра (А-Ц) и цифра-аналог (Ц-А); формирова-

тель (фиксатор); микропроцессор, реализующий линейный цифровой алгоритм, описываемый z-передаточной функцией вида

$$D_0(z, a, b) = \frac{a_m \cdot z^m + a_{m-1} \cdot z^{m-1} + \dots + a_1 \cdot z + a_0}{b_m \cdot z^m + b_{m-1} \cdot z^{m-1} + \dots + b_1 \cdot z + b_0},$$

где числовые коэффициенты a_i и b_i определяются для некоторого опорного T_0 периода дискретности. Такой цифровой регулятор с передаточной функцией $D_0(z, a, b)$ будем называть **опорным**.

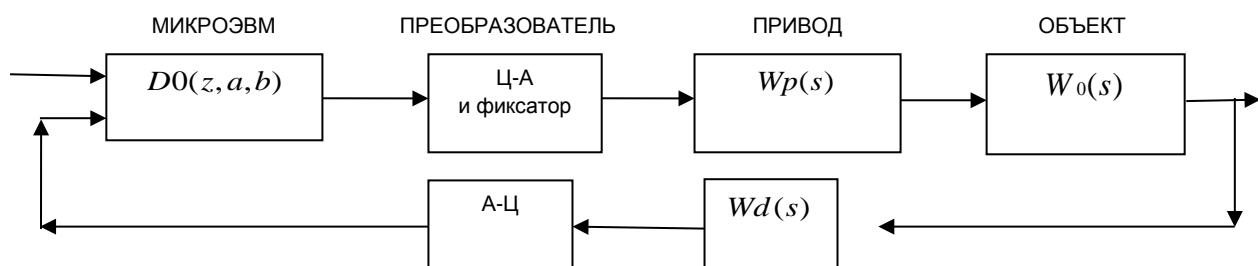


Рис.1. Структурная схема цифрового контура управления

Положим далее, что период дискретности в определённый момент времени изменился и стал равным $T1 = T0 \cdot N (N > 1)$, т. е. дискретные выборки входного сигнала $x[k]$ и выходные значения сигнала $u[k]$ цифрового регулятора должны поступать и вычисляться в изменённые моменты времени $t_k = k \cdot T0 \cdot N$.

Будем считать, что частоты $\frac{\pi}{T0}$ и $\frac{\pi}{T0 \cdot N}$ превышают частоту Найквиста [2]. Это означает, что частотные характеристики дискретной модели приведённой непрерывной части системы для периода квантования $T0$ и для изменённого периода квантования $T1 = T0 \cdot N$ практически совпадают в диапазоне частот

$$0 \leq \omega \leq \min\left(\frac{\pi}{T0}, \frac{\pi}{T0 \cdot N}\right);$$

$$W0(e^{j\omega T0}) \approx W10(e^{j\omega T0 \cdot N}).$$

Здесь $W0(z, T0)$ и $W10(z1, T1)$ – дискретные z-передаточные функции приведённой непрерывной части системы [1], состоящей из ОУ, ИУ, датчиков и формирователя;

$$W0(z, T0) = Z\{Wf(s) \cdot Wo(s) \cdot Wp(s) \cdot Wd(s)\}$$

соответствует периоду $T0$,

$$W10(z1, T1) = Z\{Wf(s) \cdot Wo(s) \cdot Wp(s) \cdot Wd(s)\}$$

соответствует периоду квантования $T1$.

Таким образом, расчётная структурная схема цифровой системы для изменённого периода квантования $T1 = T0 \cdot N$ определяется с учётом обозначений на рис. 2.

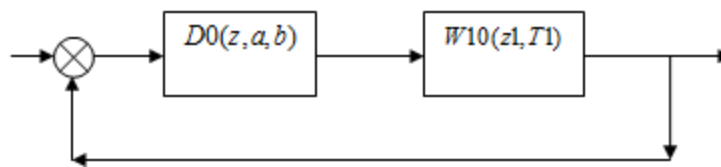


Рис.2. Расчётная структурная схема цифровой системы

Характерно, что при изменённом периоде $T1$ дискретности в схеме на рис.2 передаточная функция дискретной части системы остаётся формально неизменной, а дискретная модель $W10(z1, T1)$ непрерывной части изменяется. С другой стороны, динамические свойства (например, частотные характеристики) дискретной модели $W10(e^{j\omega T0 \cdot N})$ непрерывной части практически неизменны, а частотные характеристики дискретной части $D0(e^{j\omega T0 \cdot N}, a, b)$ изменяются. Следовательно, при изменении периода $T1$ дискретности за счёт изменения $D0(e^{j\omega T0 \cdot N}, a, b)$ будут изменяться и динамические свойства замкнутого контура.

При малом изменении периода дискретности ($N \approx 1$) и неизменных параметрах ЦАУ качественные показатели замкнутой системы будут близкими к показателям замкнутой системы при опорном периоде дискретности $T0$. При большем изменении периода дискретности ($N > 1$), но постоянной настройке цифрового регулятора, будут изменяться динамические свойства замкнутого контура и, в частности, изменятся запасы устойчивости. При значительном изменении $T1$ относительно $T0$ возможна даже потеря устойчивости.

Для обеспечения близких динамических свойств контура управления, очевидно, необходимо использовать изменённый цифровой алгоритм управления, соответствующий другой передаточной функции:

$$D10(z, a1, b1) = \frac{a1_m \cdot z^m + a1_{m-1} \cdot z^{m-1} + \dots + a1_1 \cdot z + a1_0}{b1_m \cdot z^m + b1_{m-1} \cdot z^{m-1} + \dots + b1_1 \cdot z + b1_0}$$

Здесь числовые коэффициенты a_1 и b_1 определяют ЦАУ для некоторого изменённого периода дискретности $T_1 = T_0 \cdot N$. Характерно, что в любом случае цифровая система управления с изменённым периодом дискретности будет отличаться по своим динамическим свойствам от исходной, поскольку при одной и той же непрерывной части команды управления формируются в различные моменты времени: $t_k = k \cdot T_0$ и $t_{1k} = k \cdot T_0 \cdot N$ соответственно.

Поставим задачу такого выбора и пересчёта коэффициентов a_1 и b_1 в функции от параметров a , b и коэффициента N , чтобы динамические свойства изменённого для периода T_1 цифрового фильтра (ЦФ) D_{10} были в определённом смысле близки к свойствам опорного ЦФ – D_0 . В дальнейшем такой изменённый, но близкий по динамическим свойствам цифровой фильтр назовём **подобным опорному**.

Под близостью динамических свойств ЦФ будем подразумевать два понятия:

а) близость решётчатых весовых функций ЦАУ [2]. Потребуем точного совпадения значений решётчатых весовых функций опорного $w_0[k \cdot T_0]$ и подобного $w_{10}[k \cdot T_0 \cdot N]$ ЦФ в моменты времени $t_k = k \cdot T_0 \cdot N$;

б) близость частотных характеристик $D_0(e^{j\omega T_0})$ и $D_{10}(e^{j\omega T_0 \cdot N})$.

Характерно, что при изменённом периоде дискретности ($N \neq 1$) наилучшая близость частотных характеристик вовсе не соответствует близости весовых функций ЦФ в указанном смысле. (Далее везде под весовыми функциями подразумеваются решётчатые весовые функции $w_0[k \cdot T_0]$ дискретного времени k).

Поскольку цифровые алгоритмы управления обычно описываются z -передаточными функциями невысокого порядка, то первоначально рассмотрим расчёт параметров такого подобного фильтра для простейших цифровых алгоритмов первого и второго порядка.

Перестройка параметров цифровых фильтров первого порядка общего вида

Такие фильтры описываются z -передаточной функцией вида:

$$D_0(z, a, b) = C \cdot \frac{z + a_0}{z - b_0},$$

где b_0 – корень характеристического уравнения, который определяет характер свободного движения: $b_0 > 0$ соответствует аperiодическому виду процессов, $b_0 < 0$ соответствует колебательному характеру процесса, а собственная устойчивость фильтра соответствует условию $|b_0| < 1$.

Разложим передаточную функцию на два слагаемых и получим:

$$D_0(z, T_0) = C \cdot \frac{z}{z - b_0} + C \cdot \frac{a_0}{z - b_0}.$$

Используя таблицы решётчатых весовых функций и их z -изображений из [2], вычислим решётчатую весовую (импульсную переходную) функцию звена:

$$w_0[k \cdot T_0] = C \cdot (b_0)^k + C \cdot a_0 \cdot (b_0)^{k-1} + R, \quad (1)$$

где $R = C \cdot \frac{a_0}{b_0}$ при $k = 0$ и $R = 0$ при $k > 0$.

При положительных и отрицательных значениях b_0 (при условии устойчивости ЦАУ) точки решётчатой весовой функции (1) лежат на кривых

$\pm C \cdot \left(1 + \frac{a_0}{b_0}\right) \cdot e^{\alpha \cdot t}$, причём при $b_0 > 0$ лежат

только на кривой $C \cdot \left(1 + \frac{a_0}{b_0}\right) \cdot e^{\alpha \cdot t}$, а при

$b_0 < 0$ точки попеременно переходят с одной кривой на другую. Параметр α экспоненты имеет вид: $\alpha = \frac{\ln|b_0|}{T_0}$

(рис. 3, а и б).

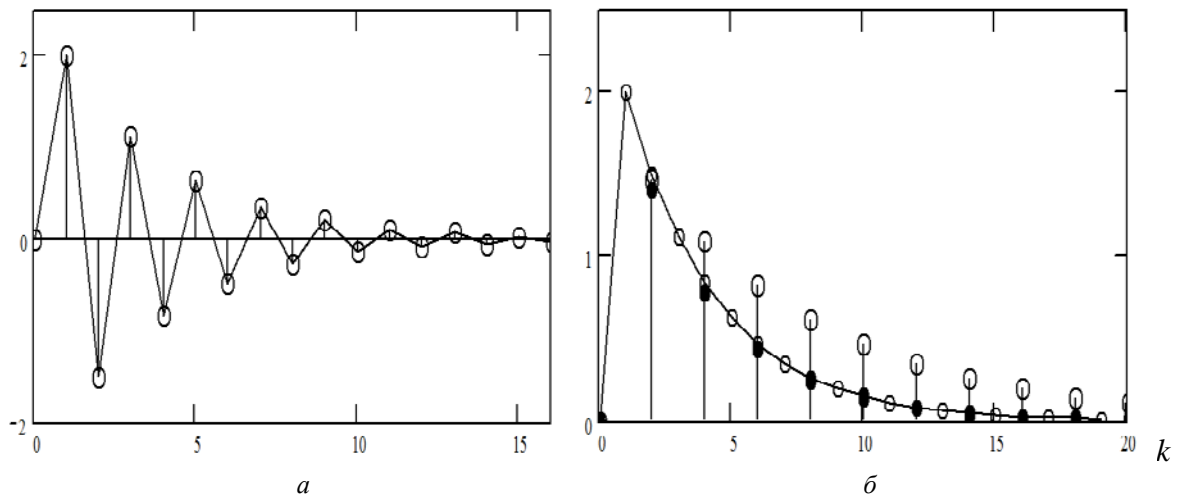


Рис. 3. Весовые функции звена первого порядка при различных параметрах $D0(z)$:

$$a - C=1, a_0 = -0,3, b_0 = -0,7; \quad \bar{b} - C=1, a_0 = -0,3, b_0 = 0,7$$

Выберем передаточную функцию $D10(z)$ подобного фильтра так, чтобы точки его весовой функции $w10[k \cdot T0 \cdot N]$ лежали на тех же кривых, что и точки $w0[k \cdot T0]$ опорного фильтра. При этом они должны совпадать с точками опорной весовой функции в отдельные моменты времени $t_k = k \cdot T0 \cdot N$. Для того, чтобы точки лежали на кривой $EXP(\ln|b_0| \cdot t / T0)$, в моменты $t = k \cdot T0 \cdot N$ должно выполняться соотношение:

$$EXP(\ln|b_0| \cdot t / T0) = EXP(\ln|b1_0| \cdot t / (T0 \cdot N)).$$

Отсюда следует: $\ln|b1_0| = N \cdot \ln|b_0|$, а значит полюс подобного фильтра $b1_0$ определится выражением $|b1_0| = |b_0|^N$, иначе:

$$b1_0 = sign(b_0) \cdot |b_0|^N. \tag{2}$$

Аналогично (1) составим весовую функцию подобного фильтра с учётом нового полюса $b1_0$:

$$\begin{aligned} w10[k1 \cdot T0 \cdot N] &= \\ &= C \cdot (b1_0)^{k1} + C \cdot a1_0 \cdot (b1_0)^{k1-1} + R1, \end{aligned} \tag{3}$$

где $R1 = C \cdot \frac{a1_0}{b1_0}$ при $k1 = 0$ и $R1 = 0$ при $k1 > 0$, а неизвестный коэффициент $a1_0$ определится из условия расположения точек весовых функций на одинаковых кривых:

$$[1 + a_0 / b_0] \cdot (b_0)^k = [1 + a1_0 / b1_0] \cdot (b1_0)^{k/N}.$$

Решая данное уравнение относительно $a1_0$, получим:

$$a1_0 = a_0 \cdot b1_0 / b_0. \tag{4}$$

Передаточная функция подобного цифрового фильтра получится применением z-преобразования к весовой функции (3):

$$D10(z) = C \cdot z / (z - b1_0) + C \cdot a1_0 / (z - b1_0). \tag{5}$$

На рис. 4 показаны графики весовых функций опорного фильтра, соответствующего периоду $T0$, и подобного ЦФ, рассчитанного по (5) для периода $T0 \cdot N$ (точечная линия). Как видно, в моменты времени $t = k1 \cdot T0 \cdot N$ точки весовых функций либо совпадают, либо лежат на симметричных кривых.

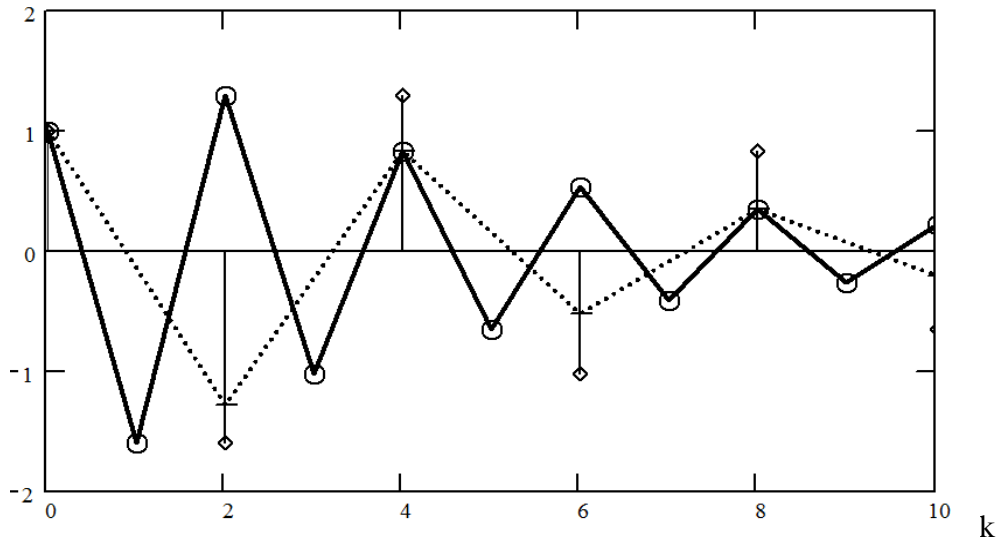


Рис. 4. Весовые функции опорного (сплошная линия) и подобного (пунктир) фильтров

Формулы (2),(4) обеспечивают совпадение значений весовых функций в моменты квантования $t = k \cdot T_0 \cdot N$ и могут использоваться для построения опорного и подобного фильтров при обработке сигнала. Однако для целей управления в замкнутом контуре пересчёт ЦАУ по формулам (2),(4) может дать неудовлетворительные результаты, т. к. опорные и подобные фильтры различаются по статическим свойствам. Действительно, если подать единичный ступенчатый сигнал $z/(z-1)$ на звено $D_0(z)$ и на звено $D_{10}(z)$, то установившиеся значения X_∞ и $X_{1\infty}$ (при $z=1$) соответственно примут вид:

$$X_\infty = C \cdot (1 + a_0) / (1 - b_0)$$

и

$$X_{1\infty} = C \cdot (1 + a_{10}) / (1 - b_{10}).$$

Таким образом, статика подобных фильтров первого порядка, полученных по соотношениям (2), (4), отличается, причём коэффициент C_1 изменения соответствует выражению

$$C_1 = \frac{X_\infty}{X_{1\infty}} = \frac{(1 + a_0)(1 - \text{sign}(b_0) |b_0|^N)}{(1 - b_{10})(1 + a_0 \cdot b_{10} / b_0)}. \quad (6)$$

Исходя из вышесказанного, формулы пересчёта, обеспечивающие близость по характеру весовой функции и точное совпадение статического коэффициента передачи, для фильтров первого порядка примут вид:

$$D_{20}(z) = C \cdot C_1 \cdot \frac{z + a_{10}}{z - b_{10}},$$

где параметры a_{10} и b_{10} подобного фильтра D_{20} определяются выражениями (2),(4), а C_1 – выражением (6).

На рис. 5 представлены графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) опорного и подобного цифровых фильтров первого порядка, полученных по формулам (2), (4), (6). Видно, что в диапазоне низких частот от 0 до $2 / T_0 \cdot N$ совпадение АЧХ достаточно точное, ошибка менее 20%, в то время как АЧХ опорного фильтра при изменённом шаге квантования (точечная линия) отличается в несколько раз (до 400%).

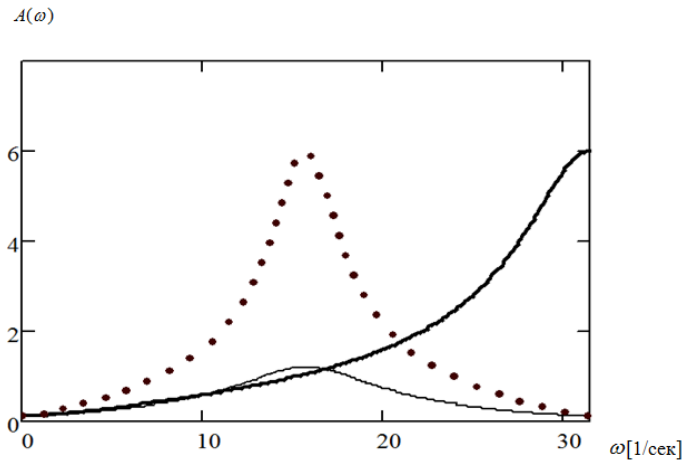


Рис. 5. АЧХ опорного фильтра (жирная линия), опорного фильтра при измененном периоде $T_0 \cdot N$ (точки) и подобного ЦФ ($N=2, a_0=-0.8, b_0=-0.7$)

При выровненных статических коэффициентах частотные характеристики подобного фильтра близки к характеристикам опорного. Однако при этом, как показывают расчёты, весовые функции не лежат на одинаковых кривых. Таким образом, формирование подобных фильтров при изменении периода T_0 можно выполнять двумя различными способами:

- использовать формулы (2), (4), обеспечивающие приближение весовых функций;

- использовать формулы (2), (4), (6), обеспечивающие приближение частотных свойств и статики.

Соответствующий выбор метода обусловлен конкретной технической задачей.

Перестройка параметров цифровых фильтров второго порядка

Рассмотрим цифровые фильтры, описываемые Z – передаточными функциями второго порядка с комплексными полюсами. Другой возможный случай, соответствующий паре действительных полюсов, может быть сведён к разбиению на два фильтра первого порядка и далее не рассматривается.

Пусть передаточная функция $D_0(z)$ опорного фильтра имеет вид:

$$D_0(z, a, b) = \frac{a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0}{b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0},$$

где векторы a и b определяют динамику ЦФ, а $b_2=1$, что всегда можно обеспечить.

Для получения весовой функции $w_0[k \cdot T_0]$ фильтра разобьём $D_0(z, a, b)$ на два слагаемых:

$$D_0(z) = \frac{a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z}{z^2 + b_1 \cdot z + b_0} + z^{-1} \cdot \frac{a_0 \cdot z}{z^2 + b_1 \cdot z + b_0}.$$

После приведения данных z -изображений к табличным из [2], получим из таблиц соответствующие оригиналы:

$$F_1[k \cdot T_0] = e^{-\alpha \cdot T_0 \cdot k} \cdot \sin(\beta \cdot T_0 \cdot k),$$

$$F_2[k \cdot T_0] = e^{-\alpha \cdot T_0 \cdot k} \cdot \cos(\beta \cdot T_0 \cdot k),$$

где числовые коэффициенты выражений F_1 и F_2 определяются через параметры a и b :

$$e^{-\alpha \cdot T_0} = \sqrt{b_0},$$

$$\cos(\beta \cdot T_0) = \frac{-b_1}{2 \cdot \sqrt{b_0}},$$

$$\sin(\beta \cdot T_0) = \frac{1}{\sqrt{b_0}} \cdot \sqrt{b_0 - \left(\frac{b_1}{2}\right)^2}.$$

Оригинал – решётчатая весовая функция фильтра $w_0[k \cdot T_0]$ определится в форме композиции табличных оригиналов. После арифметических преобразова-

ной весовая функция $w_0[k \cdot T_0]$ опорного цифрового фильтра запишется в форме:

$$w_0[k \cdot T_0] = A_1 \cdot F_2[k \cdot T_0] + A_2 \cdot F_1[k \cdot T_0] + R_2, \quad (7)$$

где $R_2 = -A_1$ при $k=0$, $R_2 = 0$ при $k > 0$. Здесь A_1 и A_2 – числовые коэффициенты при различных составляющих движениях, которые определяются через параметры

a, b исходной передаточной функции $D_0(z)$ по соотношениям:

$$A_1(a, b) = a_2 - a_0 / b_0,$$

$$A_2(a, b) = \frac{a_2 + a_0 / b_0 + 2 \cdot a_1 / (-b_1)}{\sqrt{(4 \cdot b_0 - b_1^2) / b_1^2}}.$$

Пример реализации весовой функции ЦФ второго порядка приведён на рис. 6.

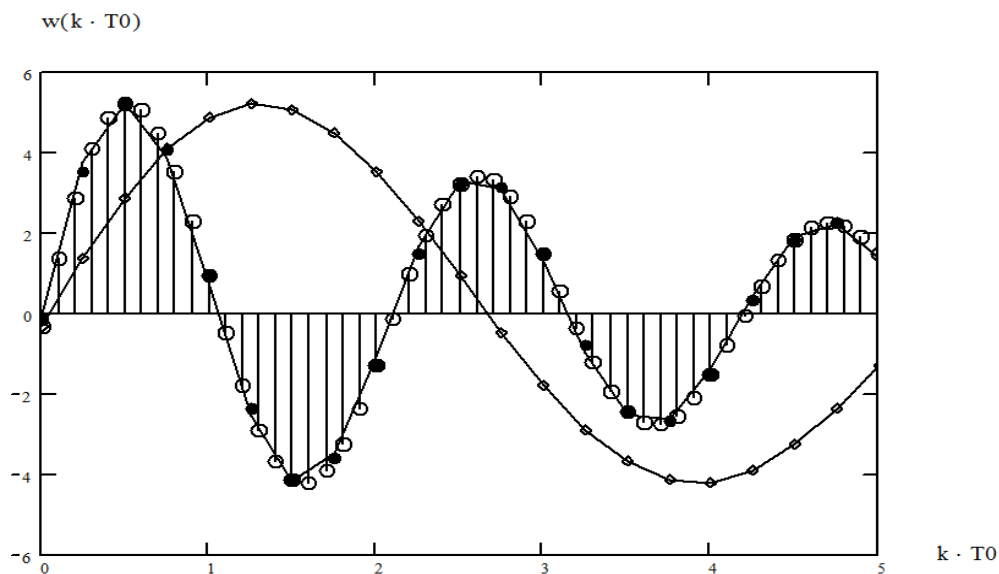


Рис. 6. Весовые функции ЦФ второго порядка: опорный фильтр (кружки), подобный фильтр (чёрные точки) и опорный фильтр при периоде $T_0 \cdot N$ ($a_2=1, a_1=0.2, a_0=0.5, b_1=-1.919, b_0=0.959, N=2.4$)

Рассмотрим далее преобразование z -передаточной функции при изменении периода дискретности $T_1 = T_0 \cdot N$. Из формулы (7) при изменении периода квантования, но при условии совпадения точек w_0 и w_1 , после преобразований получим компоненты нового вектора b_1 коэффициентов знаменателя передаточной функции $D_1(z, a_1, b_1)$:

$$b_{1_0} = [EXP(-2 \cdot \alpha \cdot T_0)]^N = b_0^N, \quad (8)$$

$$b_{1_1} = -2 \cdot \cos(N \cdot \arccos(-b_1 / 2 \cdot \sqrt{b_0})) \cdot (\sqrt{b_0})^N.$$

Для вычисления коэффициентов a_1 числителя составим уравнения из условий близости весовых функций опорного D_0 и подобного D_1 фильтров в моменты времени $t_k = k \cdot T_0 \cdot N$. Характерно, что при целом N точки весовых функций будут совпадать, а в случае дробного N точки весовой функции w_1 будут лежать на той же непрерывной кривой, что и точки весовой функции w_0 .

Данные уравнения составим для отдельных составляющих движения из (7):

$$A_1(a, b) \cdot EXP(-\alpha \cdot t) \cdot \cos(\beta \cdot t) = A_1(a_1, b_1) \cdot EXP(-\alpha \cdot t) \cos(\beta \cdot t),$$

$$A2(a,b) \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot t) \cdot \sin(\beta \cdot t) = \\ = A2(a_1, b_1) \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot t) \cdot \sin(\beta \cdot t)$$

при $t = N \cdot T_0 \cdot k_1$.

Приравнивая коэффициенты, получим два линейных уравнения для определения параметров a_i подобного фильтра. Добавив третье уравнение, полученное из условий обеспечения одинакового статического коэффициента KS опорного и подобного фильтров:

$$KS = D0(z=1) = D10(z=1) = \\ = (a_2 + a_1 + a_0) / (1 + b_1 + b_1_0),$$

запишем систему

$$\begin{aligned} a_1_2 - a_1_0 / b_1_0 &= A2(a,b), \\ a_1_2 + 2 \cdot a_1_1 / (-b_1_1) + a_1_0 / b_1_0 &= E2, \\ a_1_2 + a_1_1 + a_1_0 &= E3, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$E2 = A1(a,b) \cdot \sqrt{(4 \cdot b_1_0 - b_1_1^2) / (b_1_1^2)}, \\ E3 = (1 + b_1_1 + b_1_0) \cdot KS.$$

Система (9) – система линейных алгебраических уравнений, причём в правой части (9) стоят функции от коэффициентов a, b и b_1_i , посчитанных по соотношениям (8).

Сравнительно несложный вид (9) позволяет записать в случае невырожденности решение – коэффициенты a_i , выраженные через a_i, b_i и b_1_i :

$$a_1_2 = \frac{A2(a,b) \cdot (1 + 2 / b_1_1) + E2 + E3 \cdot (2 / b_1_1)}{2 \cdot (1 + (1 + b_1_0) / b_1_1)},$$

$$a_1_1 = A2(a,b) + E3 - a_1_2(1 + b_1_0), \quad (10)$$

$$a_1_0 = (a_1_2 - A2(a,b)) \cdot b_1_0,$$

где $A2(a,b), E2, E3$ определяются из (9) через коэффициенты b_1_i .

Таким образом, при изменении периода квантования T_0 для обеспечения близости весовой функции **подобного** цифрового фильтра **опорной** весовой функции достаточно изменять параметры цифрового фильтра в соответствии с зависимостями (2), (4) для фильтра первого порядка и по (8), (10) для фильтра второго порядка. Эти выводы справедливы и тогда, когда коэффициент N изменения периода квантования T_0 не является целым числом, поскольку и в этом случае точки весовой функции лежат на тех же линиях, что и точки весовой функции опорного фильтра. На рис.6 приведены весовые функции опорного фильтра и подобного фильтра, рассчитанного по соотношениям (8), (10) при дробном коэффициенте кратности периодов $N = 2.4$.

Построение подобных фильтров произвольного порядка

Выше были получены формулы для перестройки параметров опорного фильтра первого и второго порядка с целью получения близких весовых функций фильтра при известном коэффициенте N изменении периода дискретности $T_1 = T_0 \cdot N$. Однако в ряде случаев ЦАУ описываются z -передаточными функциями высокого порядка, больше второго.

Для перестройки параметров фильтра высокого порядка при изменении периода дискретности целесообразно использовать следующую последовательность шагов.

1. Представить z -передаточную функцию цифрового фильтра в виде суммы или произведения звеньев первого и второго порядка, используя методы последовательного или параллельного программирования ЦФ [1]. Составить программу работы цифрового вычислителя, реализующего цифровой фильтр, составленный из звеньев первого и второго порядка, с учётом изменения констант про-

граммы при изменении периода дискретности.

2. Составить программу для настройки констант каждого элементарного ЦФ в функции от параметра N по соотношениям (2),(4) и (8),(10).

3. Рассчитать пороговое значение N_{\min} кратности периода, при котором требуется перестройка параметров.

4. Осуществить идентификацию текущего значения $T0$ и, в случае необходимости, при $N > N_{\min}$ произвести перестройку параметров цифрового регулятора [3].

Пункты 1-3 выполняются на этапе разработки ЦАУ, а перестройка параметров (п.4) осуществляется в процессе работы цифровой системы управления по заранее рассчитанным и запрограммированным соотношениям.

Библиографический список

1. Шамриков Б.М. Основы теории цифровых систем управления: учеб. для высш. техн. учеб. заведений. М.: Машиностроение, 1985. 286 с.

2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 312 с.

3. Фурсов В.А. Основы построения адаптивных систем управления: учеб. пособие / под ред. Б. М. Шамрикова. М.: МАИ, 1985. 38 с.

Информация об авторе

Белогов Виктор Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

E-mail: belonogov@bk.ru. Область научных интересов: теория цифровых систем управления, автоматизация проектирования систем автоматического управления, вычислительные методы и алгоритмы задач управления.

REARRANGEMENT OF DIGITAL CONTROL ALGORITHMS WITH VARIABLE DISCRETE PITCH SIZE

© 2014 V. D. Belonogov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

The necessity to change the control task discreteness period $T0$ can arise in the course of operation when performing a multidimensional set of tasks of digital control, filtration and control on processors having limited computing power. This can be caused, for example, by a necessity to solve more important tasks occupying the computing resources at certain moments. In this case control tasks will be solved within an increased discreteness period $T0 \cdot N$, which will lead to the deterioration of the system dynamics at constant parameters of the digital regulator, and even to the loss in stability of a closed digital system, which is possible with a sufficient change of the period. A rearrangement of regulator parameters (operational conversion) versus the N parameter determining the rate of quantization period change is needed to recover the circuit dynamic properties. This algorithm rearrangement should be implemented automatically in the process of digital system functioning and, consequently, the rearrangement algorithms should take a fairly simple form. The present work is concerned with the rearrangement of digital control algorithms in case of a significant change in the discreteness period of the control task. The criteria of the proximity of digital regulator characteristics are given for the changed and initial discrete pitch size $T0$. Explicit formulae of digital regulator constant conversion are obtained for the simplest control laws based on the criteria presented and a methodology of control constants rearrangement is formed for the general case.

Digital control, discreteness period, parameter rearrangement, z-transfer functions, real frequency, system statics, frequency response, lattice weight function.

References

1. Shamrikov B.M. Osnovy teorii tsifrovyykh sistem upravleniya: uchebnyk dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy [Basic theory of digital control systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 286 p.
2. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy [Automatic control theory. V. 1. Linear systems]. Moscow: PHIZMATLIT Publ., 2007. 312 p.
3. Fursov V.A. Osnovy postroeniya adaptivnykh sistem upravleniya: uchebnoe posobie [Basics of adaptive control systems. Tutorial / ed. by B.M. Shamrikov]. Moscow: MAI Publ., 1985. 38 p.

About the author

Belonogov Viktor Dmitrievich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Systems of Automatic and Intelligent Control, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russian Federation. E-mail: belonogov@bk.ru. Area of Research: Theory of digital control systems, computer-aided design of automatic control systems, computational methods and control task algorithms.

УДК 616-082

АДАПТИВНОЕ БИОУПРАВЛЕНИЕ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЙ У БОЛЬНЫХ ТРАВМАТИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СПИННОГО МОЗГА ПРИ ОСЛОЖНЁННОМ ПЕРЕЛОМЕ ПОЗВОНОЧНИКА

© 2014 Л. П. Богданова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Целью работы была разработка метода адаптивного биоуправления с использованием зрительной и слуховой обратной связи для восстановления нарушенных или утраченных движений у больных травматической болезнью спинного мозга при осложнённом переломе позвоночника на основе данных об изменениях электрофизиологических свойств мышц и спинальных мотонейронов, вовлечённых в патологический процесс. Под наблюдением и обследованием находились 64 больных в первый месяц после травмы, из них 40 мужчин и 24 женщины. Возраст больных был от 19 до 40 лет. В зависимости от применения методик лечения все пострадавшие были распределены на две репрезентативные по полу, возрасту и степени повреждения и тяжести состояния группы. К 40 пациентам основной группы был применён разработанный новый комплекс восстановительного лечения. Группу сравнения составили 24 пациента, лечение которых проводили общепринятым методом. Для сравнения были изучены показатели электрофизиологических характеристик мышц у 120 здоровых людей. Для восстановления движений был разработан метод адаптивного биоуправления за счёт усиления зрительного и слухового контроля за сокращением мышц, вовлечённых в патологический процесс. Метод адаптивного биоуправления основан на регистрации, усилении и преобразовании биоэлектрической активности мышц, вовлечённых в патологический процесс, в световой и звуковой сигналы, которые больной наблюдает на экране электромиографа. После проведённого лечения с применением метода адаптивного биоуправления и лечебной гимнастики 85,5% больных получили возможность активного мышечного сокращения. В группе сравнения у больных положительную динамику восстановительного процесса не наблюдали.

Перелом позвоночника, травматическая болезнь спинного мозга, электромиография, адаптивное биоуправление.

В настоящее время адаптивное биоуправление широко используется в лечении. Это вызвано тем, что оно позволяет осуществлять произвольную регуляцию функций или состояний, ранее не поддававшихся контролю пациента; повышает роль сознательного участия больного в лечении. Уже после первых работ стало очевидным, что приёмы адаптивного биоуправления особенно перспективны для коррекции двигательных расстройств, поскольку позволяют искусственным образом «насыщать» дополнительную информацией регулятивные системы мозга, что способствует полезной перестройке их деятельности в условиях патологии [7, 9].

Установлено, что использование биологической обратной связи может влиять на волевой ответ определённых мышечных групп, расположенных ниже уровня повреждения спинного мозга. Ме-

тод адаптивного биоуправления со зрительной и слуховой обратной связью позволяет больному увидеть и услышать свои малейшие положительные результаты от лечебных воздействий. Особенно это касается зрения, поскольку оно служит не только для построения внутреннего образа внешнего мира, но ему присущи также и моторные функции [1, 7, 10].

Адаптивное биоуправление основано на подкреплении или «наказании» тех определённых состояний, которые отражаются в показателях регулируемых функций, и не отличается по своей сущности от условных классических рефлексов, поскольку физиологической основой обоих является замыкание временных связей. По существу это временные связи, ассоциации, объединяющие определённые состояния, при которых не всегда воз-

можно представить конкретные нервные проводники.

Как всякий рефлекторный акт, обучение отдельных систем и функций отражает адаптивное поведение организма. В связи с изменчивостью физиологических функций возможно осуществлять их обучение.

Суть приёмов регулирования функций с помощью обратной связи заключается в усилении сенсорного контроля за ними путём стимуляции или снижения их активности. Это ведёт к перестройке центральных механизмов регуляции в заданном направлении вследствие активной мобилизации функциональных резервов мозга. Благодаря этому устанавливается новый режим деятельности, в том числе и для произвольных функций [1, 3, 6].

Проблема лечения больных с осложнёнными переломами позвоночника по своей медицинской и социальной значимости занимает одно из ведущих мест в современной медицине. Это обусловлено большой частотой встречаемости и многообразием клинических форм, неясностью многих сторон патогенеза, тяжестью двигательных, чувствительных, трофических и выделительных нарушений, а также особой трудностью лечения [1, 4, 5].

Целью работы была разработка метода адаптивного биоуправления с использованием зрительной и слуховой обратной связи для восстановления нарушенных или утраченных движений у больных травматической болезнью спинного мозга при осложненном переломе позвоночника на основе данных об изменениях электрофизиологических свойств мышц и спинальных мотонейронов, вовлечённых в патологический процесс.

Под наблюдением и обследованием находились 64 больных в первый месяц после травмы, из них 40 мужчин и 24 женщины. Возраст больных был от 19 до 40 лет. Средний возраст составил 28,3 года, т. е. соответствовал самому трудоспособному периоду жизни.

Для диагностики травматической болезни спинного мозга при осложнённых

переломах позвоночника проводилось комплексное обследование больных по системам и органам с использованием современных клинических, лабораторных, электрофизиологических, лучевых методов. Больных обследовали до и после курса лечения.

Ортопедотравматологическое обследование позволяло выявить механизм травмы, локализацию повреждения, состояние костно-мышечной системы, наличие контрактур и деформаций суставов, атрофию мышц, возможность активных и пассивных движений. Это было необходимо для решения вопроса о показаниях к хирургической операции по стабилизации позвоночника.

Исследование неврологического статуса имело целью выявить уровень и характер повреждения спинного мозга, наличие его сдавления для определения необходимости хирургического устранения компрессии спинного мозга и его элементов.

Всем больным проводили электрокардиографию в стандартных отведениях и рентгенографию позвоночника в двух проекциях. Для уточнения диагноза выполнялась компьютерная и магнитно-резонансная томография. По показаниям выполнялась электроэнцефалография.

У всех больных были закрытые травмы позвоночника, что характерно для травм мирного времени. В клинической картине больных определялись: отсутствие движений и чувствительности в ногах, нарушение функции тазовых органов по типу недержания, затруднение дыхания. Рентгенологически установлено наличие стабильных повреждений в 55 случаях. У 53 больных был диагностирован ушиб спинного мозга без сдавления и у 11 – со сдавлением спинного мозга. Этим больным были проведены декомпрессирующие операции с последующей стабилизацией позвоночника.

В зависимости от применения методик лечения все пострадавшие были распределены на две репрезентативные по полу, возрасту и степени повреждения и

тяжести состояния группы. К 40 пациентам основной группы было применено адаптивное биоуправление. Группу сравнения составили 24 пациента, лечение которых проводили общепринятым методом. Для сравнения были изучены показатели электрофизиологических характеристик мышц у 120 здоровых людей.

Электромиографические исследования проводились на электромиографе «Viking Quest» фирмы Nicolett со стандартным набором электродов в постоянных микроклиматических условиях в строго определённое время суток – с 10 до 13 часов.

Электрическая активность мышц регистрировалась накожными электродами диаметром 5 мм с межэлектродным расстоянием 20 мм. До наложения электродов поверхность кожи обрабатывали спиртом.

Электроды накладывали на двигательные точки симметричных мышц шеи, туловища и конечностей. Регистрацию электрической активности мышц производили в положении «лёжа на спине» в покое и при попытке произвольного сокращения мышцы.

Качественный и количественный анализ электромиограмм проводили с ис-

пользованием общепринятых методик [3, 7, 8].

При обработке результатов клинико-электрофизиологических исследований применялись параметрические и непараметрические статистические методы. Выявленные закономерности и связи изучаемых параметров между группами и признаками были значимыми при вероятности безошибочного прогноза ($p < 0,05$).

Для восстановления движений был разработан метод адаптивного биоуправления за счёт усиления зрительного и слухового контроля за сокращением мышц, вовлечённых в патологический процесс. Метод адаптивного биоуправления основан на регистрации, усилении и преобразовании биоэлектрической активности мышц, вовлечённых в патологический процесс, в световой и звуковой сигналы, которые больной наблюдает на экране электромиографа. Восстановление движений по предложенному способу начинали, как правило, на первой неделе с момента травмы. На кожу в проекции паретичных мышц накладывали накожные электроды для снятия биоэлектрической активности мышц (рис. 1).

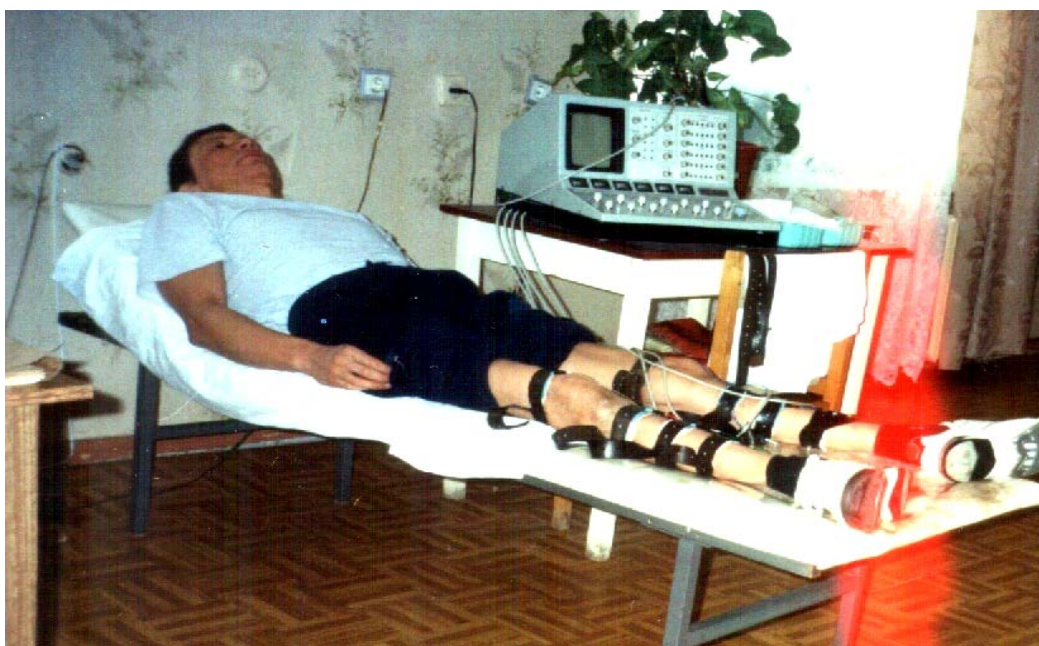


Рис. 1. Пример проведения процедуры восполнения дефицита афферентации

Вначале больных знакомили с задачами метода адаптивного биоуправления, затем врач демонстрировал возникновение и исчезновение звукового и зрительного образа суммарной интерференционной электромиограммы при сильном напряжении и при полном расслаблении здоровой мышцы как эталона, к которому должен стремиться больной. Записывали электромиограмму при сокращении мышцы, не вовлечённой в патологический процесс, с демонстрацией миограммы на экране осциллографа и фиксацией внимания больного на его ощущениях, сопровождающих мышечное сокращение. Затем предлагали пациенту воспроизвести это ощущение при попытке сокращения парализованных мышц.

На первом занятии определялись факторы и приёмы, способствующие увеличению амплитуды паретичной мышцы: пощипывания кожи в проекции четырёхглавой мышцы бедра, наложение холода на кожу или двигательные задания (разогнуть ногу, нажать на педаль и т.д.). Выбирались такие движения, которые были освоены больным до травмы на уровне двигательного стереотипа. Например, для облегчения более слабых движений голеностопного сустава посредством сохранённой и сильной четырёхглавой мышцы бедра больные выполняли разгибание в коленном суставе, а затем сгибание и пронацию в голеностопном суставе.

Выбирались один-два приёма, которые наилучшим образом способствовали увеличению амплитуды и частоты электрической активности. Затем больному предлагали выполнить один из них, фиксируя внимание на мышечном чувстве и его запоминании. Каждый приём в серии повторялся 5-7 раз по 5-6 с на одно повторение. Выполнялись 3-5 серий подряд с перерывом на 2-4 минуты. После этого больному давали задание: не выполняя компенсаторного приёма, в этом же исходном положении воспроизвести мышечное ощущение, способствующее увеличению амплитуды и частоты электрической активности.

О результатах каждой пробы врач и больной судили по амплитуде электромиограммы. Число проб в течение одной процедуры зависело от выраженности пареза и индивидуальных особенностей больного и составляло от 5 до 10. Общая продолжительность процедуры усиления афферентации, проводящейся ежедневно в основном в утренние часы (10.00-11.00), не превышала 30-40 минут.

Если больному успешно демонстрировал управление электрической активностью, то переходили к более сложным заданиям. При этом избирали соответствующую чувствительность усилительного блока.

Процедуру прекращали при нарастающем снижении (от пробы к пробе) величины биоэлектрической активности мышцы, так как это указывало на развитие утомления.

Лечение проводили ежедневно в течение 5-6 дней. Кроме того, на протяжении этого периода больные самостоятельно несколько раз в день тренировали паретичные мышцы по той же методике, но без использования электромиографа. Всего с каждым больным проводилось от 5 до 15 сеансов.

При проведении метода адаптивного биоуправления было отмечено, что 25 больным для того, чтобы научиться управлять электрической активностью паретичных мышц, понадобилось 1-2 занятия, 13 – 5-6 занятий, а у 2 пациентов положительного эффекта добиться не удалось. Во время тренировки с помощью метода адаптивного биоуправления было выявлено, что средняя амплитуда биоэлектрической активности мышцы при произвольном максимальном напряжении, осуществляемом без самоконтроля во время первой процедуры, составляла $32,2 \pm 0,72$ мкВ, а при самоконтроле с использованием электромиографической обратной связи – $51,1 \pm 0,68$ мкВ ($P < 0,05$).

По мере активной тренировки со зрительным контролем в цепи обратной связи, по-видимому, в сократительный процесс активно включается всё большее

число нейромоторных единиц, что сопровождается заметным повышением интегративных показателей и уровня синхронизации потенциалов действия.

Афферентный восходящий поток, образующийся при выполнении заданного движения, адресуется непосредственно в те центральные звенья, которые ответственны за его реализацию, т.е. имеется высокая степень целевой направленности восходящей афферентации в центральные структуры мозга. Поскольку при этом введены уровни учитываемой двигательной активности с чётким контролируемым сигналом внешней обратной связи и подразделением на правильность выполнения, то это определяет высокую степень информационной значимости поступаю-

щей в мозг двигательной афферентации, усиленную сигналами обратной связи. Это обстоятельство имеет важное значение для перестройки координационных механизмов в заданном направлении, т.к. полезный результат, являясь системообразующим фактором, преобразует и закрепляет прежде всего центральные звенья регуляции в соответствии с требованиями, предъявляемыми результатом [3, 6, 9].

В результате лечения в основной группе наблюдали появление рефлексов и слабых движений у 18 больных (45,5%). Осложнения имели место лишь у 4 больных (10,0%). В группе сравнения появление рефлексов и движений ног было у 4 человек (25,2%), осложнения развились у 6 больных (табл. 1).

Таблица 1. Результаты лечения больных травматической болезнью спинного мозга при осложнённом переломе позвоночника в основной группе и в группе сравнения

Показатели	Период заболевания			
	Первые 3 дня после травмы		Последующие 30 дней после травмы	
	Основная группа	Группа сравнения	Основная группа	Группа сравнения
Появление рефлексов и движений	13	2	5	2
Появление осложнений в виде пневмонии	-	2	4	4

При проведении метода адаптивного биоуправления было отмечено, что 25 больным для того, чтобы научиться управлять электрической активностью паретичных мышц, понадобилось 1-2 занятия, другим 13 больным 5-6. Одному больному с очень глубоким вялым парализмом (на грани плегии) и едва уловимой биоэлектрической активностью мышц (при максимальной чувствительности усилителя) это так и не удалось. Хотя у этого больного повторные процедуры с попыткой изометрического сокращения мышцы сопровождалась достоверными изменениями величины суммарной электромиограммы, но на величину развиваемого мышечного усилия у него обратная связь не влияла. У этого больного с сопутствующей травматической и алкогольной энцефалопатией было выраженное

снижение интеллектуально-мнестических функций в сочетании с постоянной подавленностью настроения. В поведении этого больного обращала на себя внимание малая личная заинтересованность в лечебном действии процедуры.

В отличие от этого больного у остальных пациентов при тренировках с изометрическим сокращением паретичной мышцы и включении в программу процедуры адаптивного биоуправления установлено следующее. Во время тренировки с помощью метода адаптивного биоуправления средняя амплитуда биоэлектрической активности мышцы при произвольном максимальном напряжении, осуществляемом без самоконтроля во время первой процедуры, составляла $32,2 \pm 0,72$ мкВ, а при самоконтроле с использованием электромиографической

обратной связи – $51,1 \pm 0,68$ мкВ ($P < 0,05$). Средняя амплитуда за шестисекундный период попытки произвольного максимального напряжения, осуществляемого без самоконтроля, составляла 2634 ± 472 условные единицы. При проведении того же упражнения с одновременным использованием электромиографической обратной связи интенсивность биоэлектрической активности увеличивалась в среднем на 60,0% и была равна 4214 ± 568 условным единицам.

Процедура адаптивного биоуправления паретичными мышцами способствовала восстановлению движений. На одном из занятий за счёт использования метода адаптивного биоуправления удавалось увеличить амплитуду электрической активности мышц на 60%. Это происходило, как показали результаты стимуляционной электромиографии, за счёт увеличения суммарной возбудимости мотонейронов: фазических мотонейронов, но в большей степени тонических мотонейронов. Несколько уменьшилось тормозное влияние центральной нервной системы.

Ведущая сторона проприоцептивного воздействия при выполнении движений заключается в обеспечении текущего функционального состояния мозга, его тонической активности и, соответственно, его регуляторных механизмов. Афферентная конструкция мозга во многом определяется мультифункциональной ролью двигательного анализатора как неперемного компонента межанализаторной интеграции и аппарата конвергенции от многих анализаторных систем организма.

Больные, как правило, предпочитали использовать в качестве индикатора визуальную картину электромиограммы, а не звуковой сигнал. Это можно объяснить тем, что зрение служит не только для построения внутреннего образа внешнего мира, но имеет и моторные функции. Зрительно опосредованная деятельность включает постоянную трансформацию поступающих зрительных стимулов в

двигательную систему благодаря моторным командам. Цикл «узнавание – деятельность» одновременно вовлекает различные уровни организации центральной нервной системы, которые удовлетворяют многообразным требованиям, связанным с целенаправленной деятельностью.

В результате ежедневных неоднократных тренировок уже к третьей процедуре отмечалось чёткое нарастание силы паретичных мышц. Амплитуда биоэлектрической активности мышцы во время поддерживаемого напряжения на этой процедуре составляла в среднем 414 ± 588 условных единиц за 6 с. Наличие самоконтроля продолжало оказывать положительное влияние, приводя к повышению биоэлектрической активности до 5203 ± 553 условных единиц за этот же период. Полученный эффект адаптивного биоуправления хотя и был менее выражен (нарастание лишь на 23%), чем во время первого упражнения, но оказался при статистической обработке достоверным.

В отличие от первых процедур при пятой процедуре величина максимального мышечного усилия оставалась одинаковой независимо от того, отсутствовал или использовался метод адаптивного биоуправления. Амплитуда суммарной электрической активности мышцы была равна соответственно 6775 ± 1027 и 6734 ± 960 условных единиц. Сравнение величин биоэлектрической активности паретичных мышц при их изометрическом сокращении в условиях самоконтроля во время первой и пятой процедур показало её нарастание в среднем на 60%. Закрепление двигательных навыков, найденных с помощью метода адаптивного биоуправления, продолжали на занятиях лечебной гимнастикой. Комплексы упражнений составлялись на основе приёмов, найденных с помощью метода адаптивного биоуправления.

Применение предложенного метода адаптивного биоуправления при тренировках с поддерживаемым изометрическим напряжением паретичной мышцы позволило в короткий срок обучить больного увеличению силы сокращения мыш-

цы. В основе этого эффекта заложены два механизма: увеличение частоты разрядов активных мотонейронов и увеличение количества вовлекаемых двигательных единиц. Как следует из представленных результатов, для реализации лечебного действия биоуправления электроактивностью мышц была необходима сохранность функции хотя бы небольшого числа двигательных единиц [2, 3].

Появление возможности у больных выполнять активные движения ногами позволяло им увеличить объём двигательной нагрузки, улучшить психоэмоциональное состояние и активнее включиться в лечебный процесс.

После проведённого лечения с применением метода адаптивного биоуправления и лечебной гимнастики 85,5% больных получили возможность активного мышечного сокращения. В группе сравнения у больных положительная динамика восстановительного процесса не наблюдалась.

Составление комплексов лечебной физкультуры на основе приёмов, найденных с помощью метода адаптивного биоуправления, повышает эффективность лечения больных травматической болезнью при осложнённых переломах позвоночника.

Библиографический список

1. Ахметова Г.И. ЭМГ-БОС в комплексном восстановительном лечении больных с травматической болезнью спинного мозга // Физкультура в профилактике, лечении и реабилитации. 2009. № 4. С. 45-47.
2. Богданова Л.П. Некоторые патофизиологические механизмы нарушения мышечного тонуса // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2004. № 4. С. 19-21.
3. Богданова Л.П. Лечение больных с двигательными нарушениями при травматической болезни спинного мозга. Самара: СамГМУ, 2005. 142 с.
4. Иванова Г.Е. Организация реабилитационного процесса // Здоровье Чувашии. 2013. № 1. С. 20-27.
5. Игнатьева О.И., Кшнейкина Е.Г., Ховряков А.В. Клинико-статистический анализ результатов комплексного лечения больных с ТБСМ // Материалы второго Международного конгресса «Нейрореабилитация». М. 2010. С. 102.
6. Косов И.С., Михайлова С.А. Метод функционального биоуправления в нейрореабилитации // Материалы науч.-практ. конф. «Реабилитация при патологии опорно-двигательного аппарата». М. 2012. С. 37-38.
7. Николаев С.Г. Практикум по клинической электромиографии. Иваново: Ивановская государственная медицинская академия, 2008. 264 с.
8. Скупченко В.В., Богданова Л.П. Патофизиологические механизмы торсионной дистонии // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 1989. № 1. С. 66-68.
9. Циркин Г.М., Джафарова О.А., Воронинский В.А., Шперлинг М.М. Двигательная реабилитация инвалидов с нарушением локомоторной функции вследствие резидуальных явлений острого нарушения мозгового кровообращения // Бюллетень сибирской медицины. 2013. Т. 12., № 2. С. 128-134.
10. Шеин А.П., Криворучко Г.А. Электронейромиографические характеристики мышц нижних конечностей у пациентов // Хирургия позвоночника. 2011. № 1. С. 56-61.

Информация об авторе

Богданова Лариса Петровна, доктор медицинских наук, профессор кафедры физического воспитания, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский

университет). E-mail: bolp111@bk.ru. Область научных интересов: адаптивное биоуправление, электромиография, стимуляционная электромиография, кардиоинтервалография, нейрореабилитация, лечебная физкультура.

ADAPTIVE BIOFEEDBACK IN THE RESTORATION OF MOVEMENTS IN PATIENTS WITH TRAUMATIC DISEASE OF THE SPINAL CORD

© 2014 L. P. Bogdanova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The aim of this work was to develop a method of adaptive biofeedback using visual and auditory feedback to repair movement disorder in patients with traumatic disease of the spinal cord in case of complex spine fracture on the basis of data on the changes in electrophysiological properties of muscles and spinal motor neurons involved in the pathological process. Sixty four patients were treated and tested in the first month after injury, 40 of them male and 24 female. Depending on the application of techniques used for the treatment all patients were divided into two groups representative by gender, age, the extent of the damage and the severity of the condition group. Forty patients of the main group were treated by a new complex of medical rehabilitation. The experimental group consisted of 24 patients whose treatment was performed by a conventional method. For comparison, we studied the electrophysiological characteristics of muscles in 120 healthy people. A method of adaptive biofeedback based on increasing visual and auditory monitoring of muscle contraction involved in the pathological process was developed to restore patients' ability of movement. The method is based on the registration, strengthening and transformation of bioelectric activity of the muscles involved in the pathological process into light and sound signals that the patient can see on the screen of the electromyograph. After the treatment using the method of adaptive biofeedback and therapeutic exercises 85,5 % of the patients developed the possibility of active muscle contraction, whereas no improvement of the recovery process was observed in the experimental group of patients.

Spine fracture, traumatic disease of the spinal cord, electromyography, adaptive biofeedback.

References

1. Akhmetova G.I. EMG biofeedback in complex rehabilitation of patients with traumatic disease of the spinal cord // *Fizkul'tura v profilaktike, lechenii i reabilitatsii*. 2009. No.4. P. 45-47. (In Russ.)
2. Bogdanova L.P. Some pathophysiological mechanisms of muscular tone impairment // *Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya*. 2004. No. 4. P. 19-21. (In Russ.)
3. Bogdanova L.P. Lechenie bol'nykh s dvigatel'nymi narusheniyami pri travmaticheskoy bolezni spinnogo mozga [Treatment of patients with movement disorders caused by traumatic disease of the spinal cord]. Samara: Samara State Medical University Publ., 2005. 142 p.
4. Ivanova G.E. Organization of the rehabilitation process // *Zdravookhranenie Chuvashii*. 2013. No. 1. P. 20-27. (In Russ.)
5. Ignatieva O.I., Kshnyakina E.G., Khovryakov A.V. Kliniko-statisticheskii analiz rezul'tatov kompleksnogo lecheniya bol'nykh s TBSM // *Materialy vtorogo Mezhdunarodnogo kongressa «Neuroreabilitatsiya»*. Moscow. 2010. P. 102. (In Russ.)
6. Kosov I.S., Mikhaylova S.A. Metod funktsional'nogo bioupravleniya v neyroreabilitatsii // *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Reabilitatsiya pri patologii*

oporno-dvigatel'nogo apparata». Moscow. 2012. P. 37-38. (In Russ.)

7. Nikolaev Y.E. Praktikum po klinicheskoy elektromiografii [Practicum on clinical electromyography]. Ivanovo: Ivanovo State Medical Academy Publ., 2008. 264 p.

8. Skupchenko V.V., Bogdanova L.P. Pathophysiological mechanisms of torsion dystonia // *Patologicheskaya Fiziologiya I Eksperimentalnaya Terapiya*. 1989. No. 1. P. 66-68. (In Russ.)

9. Tsyarkin M., Dzhafarov O.A., Voroninsky C.A., Sperling M.M. Motor rehabilitation of invalids with infringement of locomotor function due to residual PHENOMENA of stroke // *Bulletin of Siberian medicine*. 2013. V. 12, no. 2. P. 128-134. (In Russ.)

10. Shein A.P., Krivoruchko G.A. Electroneuromyographic characteristics of lower limb muscles in patients with spondylolisthesis of different genesis // *Spine surgery*. 2011. No. 1. P. 56-61. (In Russ.)

About the author

Bogdanova Larisa Petrovna, Doctor of Medical Science, Professor of the Department of Physical Education, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: bolp111@bk.ru. Area of Re-

search: adaptive biofeedback, electromyography, stimulation electromyography, cardio-intervalography, neurorehabilitation, exercise therapy.

УДК 616-082

СТИМУЛЯЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕХАНИЗМА ЛЕЧЕБНОГО ДЕЙСТВИЯ АДАПТИВНОГО БИОУПРАВЛЕНИЯ У БОЛЬНЫХ ТРАВМАТИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СПИННОГО МОЗГА

© 2014 Л. П. Богданова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Целью работы было изучение механизма лечебного действия метода адаптивного биоуправления с использованием зрительной и слуховой обратной связи для восстановления нарушенных движений у больных травматической болезнью при осложнённом переломе позвоночника на основе данных об изменениях электрофизиологических свойств мышц и спинальных мотонейронов, вовлечённых в патологический процесс. Было обследовано 64 больных в первый месяц после травмы. Возраст больных был от 19 до 40 лет, средний возраст составил 28,3 года. Мужчин было 40 и женщин – 24. Всем больным проведено полное ортопедотравматологическое, неврологическое, лабораторное, рентгенологическое, электрокардиографическое обследование. По показаниям выполняли электроэнцефалографию. Дополнительно была проведена глобальная и стимуляционная электромиография. После занятия адаптивным биоуправлением у больных отмечали повышение суммарной возбудимости спинальных мотонейронов в 2,2 раза. Возросла степень вовлечения альфа-БМН в 2,5 раза и альфа-ММН в 1,6 раза. Увеличилась чувствительность первичных мышечных окончаний на 64,5%. Практически не изменилась степень затухания спинального рефлекса при его повторном вызывании.

Перелом позвоночника, травматическая болезнь спинного мозга, электромиография, адаптивное биоуправление.

Первые данные об успешном применении методов адаптивного биоуправления при спинальной травме относятся к 70-м годам двадцатого столетия, когда были описаны случаи достижения хорошего клинического эффекта у больного с повреждением шейного отдела позвоночника и спинного мозга. Уже после первых работ [4, 5] стало ясно, что адаптивное биоуправление особенно эффективно в лечении двигательных расстройств, так как оно искусственным образом позволяет «насыщать» дополнительную информацией регулятивные системы мозга и способствует полезной перестройке их деятельности. Обучение отдельных систем и функций, как всякий рефлекторный акт, отражает адаптивное поведение организма. Изменчивость физиологических функций позволяет осуществлять их обучение.

Путём стимуляции или снижения активности функций с помощью обратной связи осуществляется их регулирование, которое заключается в усилении сенсор-

ного контроля. Это ведёт к перестройке центральных механизмов регуляции в заданном направлении из-за активной мобилизации функциональных резервов мозга и устанавливает новый режим деятельности [2, 3, 8].

Сегодня явно недостаточно научно обоснованных данных по патофизиологии двигательных нарушений, что отрицательно сказывается на подборе и разработке эффективных методов лечения пострадавших с двигательными нарушениями [8].

Целью работы было изучение механизма лечебного действия метода адаптивного биоуправления с использованием зрительной и слуховой обратной связи у больных травматической болезнью спинного мозга на основе данных об изменениях электрофизиологических свойств мышц и спинальных мотонейронов, вовлечённых в патологический процесс.

Было обследовано 64 больных в первый месяц после травмы. Возраст больных был от 19 до 40 лет, средний воз-

раст составил 28,3 года. Мужчин было 40 и женщин – 24.

Всем больным проведено полное ортопедотравматологическое, неврологическое, лабораторное, рентгенологическое, электрокардиографическое обследование. По показаниям выполняли электроэнцефалографию. Дополнительно была проведена электромиография глобальная и стимуляционная [2, 3, 8].

У всех больных были закрытые травмы позвоночника, что характерно для травм мирного времени [6, 8]. В клинической картине больных определялись отсутствие движений и чувствительности в ногах, нарушение функции тазовых органов по типу недержания, затруднение дыхания. Рентгенологически установлено наличие стабильных повреждений в 55 случаях. У 53 больных был диагностирован ушиб спинного мозга без сдавления и у 11 – со сдавлением спинного мозга, которым были проведены декомпрессирующие операции с последующей стабилизацией позвоночника.

В зависимости от применения методик лечения все пострадавшие были распределены по полу, возрасту и степени повреждения на две репрезентативные группы. У 40 пациентов основной группы был применён метод адаптивного биоуправления. Группу сравнения составили 24 пострадавших, лечение которых проводили общепринятым методом. Для сравнения были изучены показатели элек-

трофизиологических характеристик мышц у 120 практически здоровых людей.

Электромиографические исследования проводили на электромиографе «Viking Quest» фирмы Nicolett со стандартным набором электродов в постоянных микроклиматических условиях в строго определённое время суток - с 10 до 13 часов [2, 3, 10, 11]. Определялись следующие показатели стимуляционной электромиографии: максимальные амплитуды моносинаптического Н-рефлекса и мышечного М-ответа, величина Н-рефлекса при половине величины М-ответа, степень затухания Н-рефлекса при ритмической стимуляции. Кроме того, рассчитывались отношение максимальных амплитуд Н-рефлекса и М-ответа, степень вовлечения в рефлекторный ответ фазических альфа-больших мотонейронов (БМН) и тонических альфа-малых мотонейронов (ММН) [9].

При обработке результатов клинико-электрофизиологических исследований применяли параметрические и непараметрические статистические методы. Выявленные закономерности и связи изучаемых параметров между группами и признаками были значимыми при вероятности безошибочного прогноза ($p < 0,05$).

Для контроля были обследованы 120 практически здоровых людей в возрасте от 20 до 40 лет. Результаты стимуляционной электромиографии представлены в табл.1.

Таблица 1. Показатели стимуляционной электромиографии здоровых людей

Показатели	Значения показателей
Суммарная возбудимость спинальных мотонейронов	57,0±4,3
Степень вовлечения в рефлекторный ответ альфа-БМН	69,2 ± 3,6
Степень вовлечения в рефлекторный ответ альфа-ММН	53,0 ± 3,4
Степень депрессии Н-рефлекса	36,0 ± 0,6
Чувствительность первичных мышечных окончаний	22,0 ± 3,6

Для восстановления движений применялось адаптивное биоуправление для усиления зрительного и слухового контроля за сокращением мышц, вовлечённых в патологический процесс. Адаптивное биоуправление основано на регистрации, усилении и преобразовании биоэлектрической активности мышц, вовлечённых в патологический процесс, в световой и звуковой сигналы, которые наблюдает больной на экране электромиографа. Восстановление движений начинали, как правило, на второй неделе с момента травмы [2, 3].

В процессе тренировки со зрительным контролем в цепи обратной связи в сократительный процесс активно включается всё большее число нейромоторных единиц, что сопровождается заметным повышением интегративных показателей и уровня синхронизации потенциалов действия.

Поскольку афферентный восходящий поток, образующийся при выполнении определённого заданного движения, адресуется непосредственно в те центральные звенья, которые ответственны за его реализацию, то имеется высокая степень целевой направленности восходящей афферентации в центральные структуры мозга. Так как при этом введены уровни учитываемой двигательной активности с чётким контролируемым сигналом внешней обратной связи и подразделением на правильность выполнения, то это определяет высокую степень информационной значимости поступающей в мозг двига-

тельной афферентации, усиленную сигналами обратной связи. Это обстоятельство имеет большое значение для перестройки координационных механизмов в заданном направлении, т.к. полезный результат, являясь системообразующим фактором, преобразует и закрепляет, прежде всего, центральные звенья регуляции в соответствии с требованиями, определяемыми результатом [1, 11].

Нарушения показателей глобальной и стимуляционной электромиографии у больных были значительными. Было характерно существенное повышение порогов Н-рефлекса, значительное достоверное снижение амплитуд Н-рефлекса ($p < 0,001$), снижение амплитуд М-ответов и Н-М-соотношений. Часто Н-рефлекс приобретал гребневидную форму, иногда наблюдалось даже полное отсутствие Н-рефлекса. Отмечалось также некоторое снижение скорости проведения импульса по моторным волокнам *n. tibialis*. Отклонения показателей стимуляционной электромиографии больных от нормы служат диагностическим признаком гипоксии, ишемии и компрессии корешков спинномозгового нерва. Можно предположить, что патологические изменения, происходящие у больных, затрагивают как афферентную часть дуги моносинаптического рефлекса, являющуюся более восприимчивой к гипоксии, ишемии и (или) компрессии корешков спинномозгового нерва, так и эфферентную часть. Результаты стимуляционной электромиографии больных представлены в табл.2.

Таблица 2. Показатели стимуляционной электромиографии больных до и после первой процедуры адаптивным биоуправлением

Показатели	До процедуры	После процедуры
Суммарная возбудимость спинальных мотонейронов	7,2±1,7	37,5±2,9
Степень вовлечения в рефлекторный ответ альфа-БМН	17,0±0,4	43,0±2,6
Степень вовлечения в рефлекторный ответ альфа-ММН	43,0±0,6	72,0±1,8
Степень депрессии Н-рефлекса	64,0±5,2	60,0±4,2
Чувствительность первичных мышечных окончаний	28,1±3,9	46,4±2,1

При сравнении показателей стимуляционной электромиографии больных и здоровых людей (табл. 1, 2) выявлено, что у больных значительно снижен показатель суммарного возбудимости мотонейронов (на 47,3%) в основном за счёт снижения степени вовлечения в рефлекторный ответ альфа-БМН (на 72,1%) и альфа-ММН (на 19,5%). Увеличилась степень затухания рефлекса при его повторном вызывании (на 69,8%), чувствительность первичных мышечных окончаний (на 36,4%).

Как видно из табл. 2, после занятия адаптивным биоуправлением у больных отмечали повышение суммарной возбудимости спинальных мотонейронов в 2,2 раза. Возросла степень вовлечения альфа-БМН в 2,5 раза и альфа-ММН в 1,6 раза, приближаясь к показателям здоровых людей. Увеличилась чувствительность первичных мышечных окончаний (на 64,5%). Практически не изменилась степень затухания спинального рефлекса при его повторном вызывании.

Роль проприоцептивного воздействия при выполнении движений заключается в обеспечении текущего функционального состояния мозга, его тонической

активности и, соответственно, его регуляторных механизмов. Аfferентная конструкция мозга во многом определяется мультифункциональной ролью двигательного анализатора как неперемного компонента межанализаторной интеграции и аппарата конвергенции от многих анализаторных систем организма.

Применение адаптивного биоуправления при тренировках паретичной мышцы позволило в короткий срок обучить больного увеличению силы сокращения мышцы. В основе этого эффекта, вероятно, заложены два механизма: увеличение частоты разрядов активных мотонейронов и количества вовлекаемых двигательных единиц. Как следует из представленных результатов, для реализации лечебного действия адаптивного биоуправления электрической активностью мышц была необходима сохранность функции хотя бы небольшого числа двигательных единиц.

Таким образом, человек может регулировать мышечное сокращение благодаря получению дополнительной информации в виде сигналов обратной связи о его состоянии, что помогает ему восстанавливать движение.

Библиографический список

1. Ахметова Г.И. ЭМГ-БОС в комплексном восстановительном лечении больных с травматической болезнью спинного мозга // Физкультура в профилактике, лечении и реабилитации. 2009. № 4. С. 45-47.
2. Богданова Л.П. Некоторые патофизиологические механизмы нарушения мышечного тонуса // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2004. № 4. С. 19-21.
3. Богданова Л.П. Лечение больных с двигательными нарушениями при травматической болезни спинного мозга. Самара: СамГМУ, 2005. 142 с.
4. Иванова Г.Е. Организация реабилитационного процесса // Здоровоохранение Чувашии. 2013. № 1. С. 20-27.
5. Иванова Т.Н., Кулакова Н.Г. Электронейромиография в оценке нейро-реабилитации больных воспалительными заболеваниями позвоночника // Материалы второго Международного конгресса «Нейрореабилитация». 2010. С.101-102.
6. Игнатъева О.И., Кшняйкина Е.Г., Ховряков А.В. Клинико-статистический анализ результатов комплексного лечения больных с ТБСМ // Материалы второго Международного конгресса «Нейрореабилитация». 2010. С. 102.
7. Косов И.С., Михайлова С.А. Метод функционального биоуправления в нейрореабилитации // Материалы научно-практической конференции «Реабилитация при патологии опорно-двигательного аппарата». М., 2012. С. 37-38.

8. Николаев С.Г. Практикум по клинической электромиографии. Иваново: Ивановская государственная медицинская академия. 2008. 264 с.

9. Скупченко В.В., Богданова Л.П. Патологические механизмы торсионной дистонии // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 1989. № 1. С. 66–68.

10. Циркин Г.М., Джафарова О.А., Воронинский В.А., Шперлинг М.М. Дви-

гательная реабилитация инвалидов с нарушением локомоторной функции // Бюллетень сибирской медицины. 2013. Т. 12, № 2. С. 128-134.

11. Шеин А.П., Криворучко Г.А. Электронейромиографические характеристики мышц нижних конечностей у пациентов // Хирургия позвоночника. 2011. № 1. С. 56–61.

Информация об авторе

Богданова Лариса Петровна, доктор медицинских наук, профессор кафедры физического воспитания, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский уни-

верситет). E-mail: bolp111@bk.ru. Область научных интересов: адаптивное биоуправление, электромиография, стимуляционная электромиография, кардиоинтервалография, нейрореабилитация, лечебная физкультура.

STIMULATION ELECTROMYOGRAPHY IN DETERMINING THE MECHANISM OF THERAPEUTIC ACTION OF ADAPTIVE FEEDBACK FOR PATIENTS WITH TRAUMATIC DISEASE OF THE SPINAL CORD

© 2014 L. P. Bogdanova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The aim of this work was to study the mechanism of the therapeutic action of the adaptive biofeedback method using visual and auditory feedback to repair movement disorder in patients with traumatic disease of the spinal cord in case of complex spine fracture on the basis of data on the changes in electrophysiological properties of muscles and spinal motor neurons involved in the pathological process. Sixty four patients were treated and tested in the first month after injury, 40 of them male and 24 female. The age of the patients ranged from 19 to 40 years, the average age being 28,3 years. All the patients were subjected to a complete orthopedic and traumatological, neurological, laboratory, radiographic and electrocardiographic examination. Electroencephalography was also carried out if required on therapeutic grounds. After adaptive biofeedback an increase in total excitability of the patients' spinal motor neurons by a factor of 2,2 was noted. The involvement of alpha-BMN increased by a factor of 2,5 and that of alpha TNM increased by a factor of 1.6 approaching the performance of healthy people. The sensitivity of primary muscle endings increased by 64,5%. The degree of attenuation of the re-induced spinal reflex practically did not change.

Spine fracture, traumatic disease of the spinal cord, electromyography, adaptive biofeedback.

References

1. Akhmetov G.I. EMG biofeedback in complex rehabilitation of patients with traumatic disease of the spinal cord // Fizkul'tura v profilaktike, lechenii i reabilitatsii. 2009. No.4. P. 45-47. (In Russ.)

2. Bogdanova L.P. Some pathophysiological mechanisms of muscular tone impairment // Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya. 2004. No. 4. P. 19-21. (In Russ.)

3. Bogdanova L.P. Lechenie bol'nykh s dvigatel'nymi narusheniyami pri travmaticheskoy bolezni spinnoy mozga [Treatment of patients with movement disorders caused by traumatic disease of the spinal cord]. Samara: Samara State Medical University Publ., 2005. 142 p.
4. Ivanova G.E. Organization of the rehabilitation process // Zdravookhranenie Chuvashii. 2013. No. 1. P. 20-27. (In Russ.)
5. Ivanova T.N., Kulakova N.G. Elektroneyromiografiya v otsenke neyroreabilitatsii bol'nykh vospalitel'nymi zabolevaniyami pozvonochnika // Materialy vtorogo mezhdunarodnogo kongressa «Neyroreabilitatsiya». Moscow. 2010. P. 101-102. (In Russ.)
6. Ignatieva O.I., Kshnyakina E.G., Khovryakov A.V. Kliniko-statisticheskiy analiz rezul'tatov kompleksnogo lecheniya bol'nykh s TBSM // Materialy vtorogo mezhdunarodnogo kongressa «Neyroreabilitatsiya». Moscow. 2010. P. 102. (In Russ.)
7. Kosov I.S., Mikhaylova S.A. Metod funktsional'nogo bioupravleniya v neyroreabilitatsii // Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Reabilitatsiya pri patologii oporno-dvigatel'nogo apparata». Moscow. 2012. P. 37-38. (In Russ.)
8. Nikolaev Y.E. Praktikum poklinicheskoy elektromiografii [Practicum on clinical electromyography]. Ivanovo: Ivanovo State Medical Academy Publ., 2008. 264 p.
9. Skupchenko V.V., Bogdanova L.P. Pathophysiological mechanisms of torsion dystonia // Patologicheskaya Fiziologiya I Eksperimentalnaya Terapiya. 1989. No. 1. P. 66-68. (In Russ.)
10. Tsyarkin M., Dzhafarov O.A., Voroninsky C.A., Sperling M.M. Motor rehabilitation of invalids with infringement of locomotor function due to residual PHENOMENA of stroke // Bulletin of Siberian medicine. 2013. V. 12, no. 2. P. 128-134. (In Russ.)
11. Shein A.P., Krivoruchko G.A. Electroneuromyographic characteristics of the muscles of the lower extremities in patients // Spinesurgery. 2011. No. 1. P. 56-61. (In Russ.)

About the author

Bogdanova Larisa Petrovna, Doctor of Medical Science, Professor of the Department of Physical Education, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: bolp111@bk.ru. Area of Re-

search: adaptive biofeedback, electromyography, stimulation electromyography, cardio-intervalography, neurorehabilitation, exercise therapy.

УДК 336(470.73)

ББК У9(2Р – 4САМ)262.53

КРЕДИТНО-БАНКОВСКАЯ СИСТЕМА В 1920-е ГОДЫ В САМАРСКОМ РЕГИОНЕ

© 2014 Н.Ф. Банникова, М.О. Самуилова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье отражены изменения в системе банковского кредитования в 1920-е годы на примере деятельности Самарского городского коммунального банка. Выделены основные задачи развития экономики и прежде всего денежного обращения в условиях нового экономического курса советского правительства. Обращено внимание на состояние экономической системы региона, изменение функций коммунального банка в сфере промышленности, сельского хозяйства, оптовой торговли и транспорта. Показаны взаимоотношения Центрального банка коммунального хозяйства и жилищного строительства с региональными банками, а также роль Самарского городского коммунального банка в развитии жилищного строительства и коммунального хозяйства в регионе. Особое внимание уделялось решению задачи действия строительства жилья для рабочих. Выделено право коммунальных банков выпускать облигационные займы, определены изменения условий работы региональных банков в конце 1920-х годов.

Отражены процессы реорганизации финансово-кредитной системы, связанные с усилением централизации хозяйствования и становлением плановой экономики. Обращено внимание на особенности деятельности Самарского городского коммунального банка после проведения административно-территориальной реформы. Содержатся статистические данные о результатах деятельности Самарского городского коммунального банка в исследуемый период.

Коммерческие банки, частный сектор, кредитование, реорганизация, коммунальное хозяйство, долгосрочные кредиты, жилищное строительство.

В современных условиях социально-экономического развития нашей страны проблемы функционирования банковской системы имеют особое актуальное значение. Вопросы развития финансовой системы в 1920-е годы в последнее десятилетие рассматривали многие учёные: Г.А. Черемисин [1], А.Д. Гусаков, И.А. Дымшиц [2], А.Г. Феклисов [3], И.А. Гатауллина [4], Н.И. Волосухина [5], С.И. Лаврененко [6], Ю.Н. Седой [7]. Однако исследователи в основном освещали проблемы финансовой политики советского государства и денежного обращения. Вопросу развития кредитно-банковской системы в этот период в Самарском регионе уделено недостаточно внимания.

Осенью 1920 года в стране разразился глубокий кризис, который проявлялся во всех отраслях жизни. Рубль был ещё жив, но его покупательная способность тысячекратно упала по сравнению с дово-

енным периодом. Государственные финансы превратились за годы Гражданской войны в чисто «эмиссионное хозяйство». Правительство страны было вынуждено взять курс на новую экономическую политику.

На X съезде РКП(б) были определены важнейшие направления новой экономической политики: замена продразвёрстки продовольственным налогом, утверждение частной торговли, развитие кооперативной торговли. Широкое внедрение экономических методов в руководстве хозяйством потребовало иных принципов финансирования и кредитования, а также развития денежного обращения. Это вызвало необходимость восстановления деятельности Государственного банка. 30 июня 1921 года был издан декрет Совета народных комиссаров об отмене ограничений денежного обращения и мерах к развитию вкладной и переводной опера-

ции. 4 октября 1921 года В.И. Ленин подписал декрет СНК об учреждении Государственного банка РСФСР. Согласно новому положению Государственный банк РСФСР становился хозяйственной организацией, созданной с «целью способствовать кредитом и прочими банковскими операциями развитию промышленности, сельского хозяйства и товарооборота, а также с целью концентрации денежных оборотов и проведения других мер, направленных к установлению правильного денежного обращения». Он имел право предоставлять кредиты промышленным и торговым предприятиям различных форм собственности, а также сельским хозяйствам и кустарям [8, с. 75].

С 1922 года появляются новые кредитные учреждения. Правительство старалось привлечь к восстановлению экономики все свободные средства, поэтому оно поощряло инициативу образования негосударственных банков.

В течение 1922–1925 годов были созданы акционерные банки: Промышленный банк, Электробанк, Внешторгбанк и Среднеазиатский банк, а также кооперативные банки: Всероссийский кооперативный банк и Украинбанк. Были открыты Центральный сельскохозяйственный банк и республиканские банки. Возникшие наряду с Госбанком СССР специальные банки оказались по сути дела коммерческими. Это способствовало формированию банковской системы в условиях развития рыночных отношений.

Согласно Декрету ВЦИК и СНК СССР от 18 января 1923 года стали создаваться коммунальные банки [9]. В январе 1925 года был утверждён устав Центрального банка коммунального хозяйства и жилищного строительства – Цекомбанка. Средства в новое учреждение стекались из государственного бюджета в виде прямых ассигнований, из фондов улучшения быта рабочих казённых предприятий, из отчислений на социальное страхование [1, с.91].

Коммунальные банки в провинциях учреждались только Губернским испол-

нительным комитетом как акционерные общества с обязательной долей в акционерном капитале самого губисполкома в объёме не менее 51 процента.

Целью коммунальных банков на местах было содействие банковскими операциями восстановлению и развитию местной экономической жизни, предоставление местному населению кредита на нужды городского строительства всех видов и обслуживание краткосрочным кредитом местных государственных, кооперативных и частных предприятий. Выпуск коммунальными банками облигационных займов допускался лишь с разрешения Народного комиссариата финансов и Народного комиссариата внутренних дел. Декретом СНК и СССР от 18 января 1923 года Народному комиссариату финансов по соглашению с Народным комиссариатом внутренних дел было поручено разработать устав губернских и городских банков, определяющий круг операций коммунальных банков и правила их производства, а равно порядок управления банков, и представить его на утверждение Совета труда и обороны [9].

Газета «Известия» от 16 декабря 1923 года в соответствии с постановлением Совета труда и обороны СССР от 21 ноября 1923 года опубликовала объявление Валютного управления Народного комиссариата об утверждении устава акционерного общества «Самарский городской банк» [10, л. 21].

Открытие Самарского городского коммунального банка состоялось 10 апреля 1924 года. Первоначальный капитал банка составил 200 000 рублей [11, л. 1]. Задачи банка в основном сводились к следующему: кредитование коммунального хозяйства, жилищного строительства и местного торгово-промышленного оборота [12, л. 184]. Первыми акционерами стали: Губернский исполнительный комитет (количество акций – 1020); Жигулевский пивоваренный завод (количество акций – 5); Селькредсоюз (количество акций – 10); Госторг (количество акций – 5); гражданин С.Г. Райнус (количество акций – 5);

А.Г. Козьмин (количество акций – 2) [13, л. 3].

Самарскому городскому коммунальному банку пришлось приступить к развитию своей операционной деятельности в период проведения денежной реформы. Главными мероприятиями, связанными с этой реформой, были: прекращение эмиссии советских знаков, сокращение выпуска банкнот и ослабление вследствие этого притока вкладов. Это давало возможность работать банку на первых порах исключительно на свой основной капитал, который к моменту открытия деятельности банка, т.е. к десятому апреля 1924 года, составлял 50 904 руб. [13, л.21].

За первый операционный год работы Самарского городского коммунального банка по текущим счетам и вкладам господствующее положение занимали государственные учреждения и госторговля. Они составляли 93,3 % процента всех вкладов. Кооперация – 6,3 %, розпромшленность – 5%, частные лица и предприятия – 0,4 % [13, л. 23].

В связи с отсутствием в стране эффективного аппарата оптовой торговли банки в 1923 году были вынуждены осуществлять торговлю товарами, принимая их от клиентов в погашение платежей и реализуя на рынке [8, с. 83]. За 1924 – 1925 годы Самарский городской коммунальный банк принял на комиссию товаров на сумму 147 тыс. 239 руб. 79 коп. [13, л. 24].

Работу по активным операциям Самарский городской коммунальный банк старался приблизить к потребностям промышленности, торговли и коммунального хозяйства. Статистика показывает, что значительная часть кредитов была выдана на нужды коммунального хозяйства и благоустройства города – 239 тыс. 411 руб. 75 коп., а также предприятиям местной промышленности и губторгу – 744 тыс. 473 руб. 51 коп. Примерно такую же сумму получили потребительская и сельскохозяйственная кооперации. 12 тыс. 443 руб. было выдано иногородним предприя-

тиям и учреждениям. Кредиты получали и частные предприятия, но в небольших объемах – 53 тыс. 569 руб. 83 коп. Также осуществлялись операции по ссудам под процентные бумаги и ремонтно-строительные ссуды [13, л. 24 (об)].

Ссуды под процентные бумаги выдавались банком исключительно рабочим и служащим под залог полученных ими в обязательном порядке облигаций 6%-го государственного выигрышного займа (в счёт жалованья). Ремонтно-строительные ссуды, выдававшиеся исключительно рабочим и служащим, распределялись в Самаре только Самарским городским коммунальным банком.

Сумма задолженности по этим операциям была высокой. Главная масса клиентов по этим ссудам были рабочие и служащие, а для них погашение обязательств даже в такой льготный срок было не по силам. Несмотря на то, что ремонтно-строительные ссуды выдавались на 12 месяцев, выплачивались они нерегулярно. В целом коммунальными банками страны было выдано краткосрочных кредитов в 1924 году 85,6 млн. руб., а в 1927 году 273,7 млн. руб. [1, с. 97].

Коммунальные банки в регионах не имели денег для долговременных вложений, и проблема выделения кредитов на жилищное строительство стояла остро [1, с. 91]. Самарский городской коммунальный банк проводил ссудные операции долгосрочного характера за счёт собственных средств. В итоге 26% собственных средств банк ассигновал на восстановление жилищ [13, л. 24а]. В 1925 году было принято решение выпустить ещё 3000 акции по 100 рублей золотом каждая [13, л. 25(об)]. Увеличение капитала было вызвано необходимостью нарушения в отдельных случаях двадцать четвёртого параграфа устава, который устанавливал лимит открываемых кредитов не более 10000 руб. Наличие в Самаре крупных хозяйственных организаций требовало увеличения лимитов [13, л. 26].

К 1926 году были реализованы два выпуска акций и основной капитал банка

стал равным 500 000 рублей. По Директиве четвертого собрания акционеров Правлением Самарского городского коммунального банка было возбуждено ходатайство об увеличении основного капитала на 250 000 рублей, и он составил 750 000 рублей, из которых 75 000 руб. должен был приобрести губернский исполнительный комитет [14, л. 2д].

Губернскому исполнительному комитету в 1926 году принадлежало 39,96 % акций, а в 1927 году – 47,12 % акций. Тем не менее доля губернского исполнительного комитета в акционерном капитале банка не достигала уставной нормы 51%. Доля частных держателей акций составляла всего лишь 6,53%. В руках государственных и кооперативных учреждений находилось 42,58% акций [14, л. 2д].

Акционерами Самарского городского коммунального банка были: Кожзавод, Ватная фабрика, Мелекесская льнопрядильная ткацкая фабрика, Полиграфпром, Мукомольный трест, акционерное общество «Хлебопродукт». Кроме этого акции приобретались кооперативными обществами инвалидов Бузулука, Мелекесса. Были акционеры из городов других областей, например торгово-промышленное товарищество братьев Тикуновых из Казани [15, л. 19 – 22]. Всего по трём выпускам было реализовано 6343 акции [15, л. 22]. Широкий список акционеров свидетельствовал о доверии общества к банку. В планах по кредитам доминировали коммунальное и жилищное дело, их величина достигала 47,6 %, т.е. почти полностью покрывала размер, устанавливаемый директивой Собрания акционеров. Выдавались ссуды и на ведение работ по восстановлению и ремонту домовладений [14, л. 2ж(об)].оборотные средства банка черпались из следующих источников: акционерный капитал, остатки по вкладным операциям и займы в других кредитных учреждениях [12, л. 184]. Коммерческий банк Самары как финансовый посредник осуществлял деятельность по предоставлению кредитов, продаже ценных бумаг. Банк выполнял свои функции и успешно

осуществлял активные и пассивные банковские операции.

Открытие специальных банков вдохнуло жизнь в долгосрочные ссудные операции, величина которых по всей банковской системе страны ежегодно удваивалась в течение 1924 – 1927 гг.[1, с. 91]. Деятельность коммунального банка Самары позволяла решать многие экономические проблемы региона.

В целях упорядочения отношений между банками и их клиентурой постановлением ЦИК и СНК СССР от 15 июня 1927 г. «О принципах построения кредитной системы» в организационную структуру кредитной системы СССР были внесены существенные изменения [16]. Эти изменения, главным из которых было размежевание клиентуры между банками, должны были сыграть ведущую роль в приспособлении кредитной системы к потребностям социалистической индустриализации.

Предусматривалось укрепление кредитного контроля и повышение ответственности банков за рациональное использование кредитных ресурсов. На Государственный банк возлагалось общее руководство кредитной системой с правом контроля за использованием кредитов отраслевыми банками.

За Госбанком закреплялась основная клиентура союзного и республиканского значения; на него было возложено кредитование заготовительных организаций, транспорта, основных государственных торговых предприятий, а также предоставление ссуд кредитным учреждениям. В функции отраслевых банков входило обслуживание соответствующих отраслей народного хозяйства как краткосрочным, так и долгосрочным кредитом. Постановление, кроме этого, предусматривало не только размежевание клиентуры между банками, но и разделение краткосрочного и долгосрочного кредитования.

На систему коммунального кредита в соответствии с требованиями перестройки работы коммунальных банков возлагалась ответственная задача расши-

рения долгосрочного кредитования. Центральный коммунальный банк с самого начала был создан как банк преимущественно долгосрочного кредита, но и операции по краткосрочному кредитованию продолжали занимать немалое место. Так, на 1 октября 1925 г. Цекомбанк выдал долгосрочных ссуд – на 27,6 млн. руб., а краткосрочных – на 10,7 млн. руб. В 1926 г. соответствующие цифры уже составляли 132,1 млн. руб. и 18,8 млн. руб. [2, с. 117]. Важный перелом в деятельности банков произошёл в результате размежевания клиентуры между ними, а также в связи с передачей в распоряжение Цекомбанка специального фонда для долгосрочного кредитования коммунального хозяйства.

За период с 1 октября 1926 г. по 1 октября 1929 г. долгосрочный кредит Цекомбанка увеличился с 132 до 612 млн. руб., т. е. в 4,6 раза, а удельный вес этого кредита в общей сумме учётно-ссудных операций банка повысился с 87,5 до 94,5% [2, с. 117].

Иначе обстояло дело с местными коммунальными банками. Эти банки продолжали широко оказывать краткосрочный кредит. Для расширения долгосрочного коммунального кредита необходимо было увеличить долгосрочные пассивы коммунальных банков. Серьёзный сдвиг в этом направлении произошёл в связи с созданием специальных фондов долгосрочного кредитования жилищного строительства и роста операций местных коммунальных банков, выполняемых по поручению Центрального банка коммунального хозяйства и жилищного строительства.

В 1927 – 1928 гг. система коммунальных банков с их специализацией в долгосрочном жилищно-строительном и коммунальном кредите укреплялась. Такое направление работы коммунальных банков было обусловлено изменениями, произошедшими в местном хозяйстве, которое взяло курс на индустриализацию, и ростом рабочего жилищного и культурно-бытового строительства в связи с ро-

стом численности и улучшением бытовых условий рабочего класса.

В 1927 году были отменены положения постановлений и инструкций правительства 1924-1926 г.г. по жилищному строительству. Были введены новые положения, в которых отмечалось, что главной задачей Центрального банка коммунального хозяйства в жилищном строительстве и соответственно местных коммунальных банков является содействие строительству жилья для рабочих [17].

В дополнение к этому постановлением от 4 января 1928 г. «О жилищной политике» [18] был сделан акцент на улучшение общего состояния жилищного и коммунального хозяйства, что имело первостепенное значение в деле индустриализации страны. В связи с этим правительство поставило задачу дальнейшего увеличения жилой площади для рабочих промышленности и транспорта. Для решения этой задачи было необходимо усилить темпы строительства новых жилищ, укреплять, развивать и удешевлять кооперативное и жилищное строительство, упорядочить его организацию.

Кредиты, отпускаемые через Центральный банк коммунального хозяйства и жилищного строительства на строительство коммунальных предприятий и сооружений, выдавались на строительство и в рабочих посёлках. Они возводились предприятиями промышленности, транспорта и связи, жилищно-строительной кооперацией вне районов жилищного строительства, осуществляемого местными советами [18]. Деятельность коммунальных банков велась в соответствии с данными решениями руководства страны.

24 января 1928 года на заседании правления Самарского городского коммунального банка под председательством М.А. Суворова было принято решение о переименовании отдела целевых кредитов в отдел долгосрочного кредитования. В штат отдела была введена должность техника [19, л.3 – 3(об)]. В соответствии с инструкцией Центрального банка коммунального хозяйства и жилищного строи-

тельства о кредитовании индивидуального строительства техник рассматривал возможности удешевления строительства [20, л. 47].

Ссуды выдавались на жилищное строительство, коммунальное хозяйство и нужды местной строительной промышленности. Кроме этого, были очерчены сроки ссуд. Например, на жилищное строительство ссуды выдавались сроком на 25 лет, а на коммунальное хозяйство – на 10 лет [20, л. 89].

В мае 1928 года Самара становится центром Средне-Волжской области – крупного экономического района РСФСР на базе Самарской, Оренбургской, Пензенской и Ульяновской губерний [21, с.107]. Самарский городской коммунальный банк в связи с этим был переименован в Средне-Волжский областной коммунальный банк.

6 февраля 1929 года состоялось расширенное заседание Президиума Средне-Волжского областного исполнительного комитета Советов. На заседании было отмечено, что существующая система коммунальных банков не отвечает организационной структуре в условиях областного районирования и не удовлетворяет хозяйственно-экономическим запросам местного хозяйства области. За коммунальным банком был закреплён ряд функций: долгосрочное и краткосрочное кредитование местного коммунального хозяйства, жилищного строительства, долгосрочное кредитование промышленности местного значения и обслуживание краткосрочными кредитами местных государственных и кооперативных предприятий. Для совершенствования кредитования и максимального планового использования с большей эффективностью финансовых средств было решено создать Средне-Волжский областной акционерный коммунальный банк с местопребыванием в городе Самаре [20, л. 137].

Был утверждён основной капитал Средне-Волжского областного акционерного коммунального банка в размере 2 млн. 500 тыс. рублей. В него входили: 674

тыс. руб. Самарского коммунального банка, 454 тыс. руб. Пензенского, 407 тыс. руб. Оренбургского, 137 тыс. руб. Ульяновского. Предполагалось выпустить дополнительные акции областного комбанка на 777 тыс. руб. и разместить их среди областных организаций, исполкомов и горсоветов.

Для сосредоточения местных средств и лучшего обслуживания Средне-Волжским областным акционерным коммунальным банком на местах были созданы филиалы. В Самаре – филиал при Областном коммунальном банке, Пензе, Ульяновске и Оренбурге – отделения областного банка. В Сызрани, Рузаевке – агентства областного коммунального банка, в Кузнецке и Бугуруслане – расчётные кассы [20, л. 137].

В феврале 1929 года правлением Средне-Волжского областного акционерного коммунального банка было разработано положение об отделе долгосрочного кредитования. На отдел долгосрочного кредита возлагались задачи: 1) составление планов целевого долгосрочного и краткосрочного кредитования в пределах области, производящегося через систему коммунального кредита; 2) сбор всех специальных средств, которые согласно действующим законам и распоряжениям центральной и местной власти должны быть направлены на кредитование жилищного строительства, коммунального хозяйства и местной промышленности; 3) наблюдение за правильным и целесообразным использованием средств по выданным ссудам и за правильным производством строительства в соответствии с условиями договоров заёмщиков.

В своей работе по оформлению и выдаче целевых ссуд отдел долгосрочного кредитования должен был руководствоваться: 1) постановлениями центральной и местной власти; 2) уставом банка; 3) инструкциями и правилами Цekomбанка (в отношении ссуд, выдаваемых из средств Цekomбанка); 4) инструкциями и правилами, утверждёнными правлением (в от-

ношении всех остальных ссуд) [20, л. 132 – 132 (об).].

Первый пятилетний план экономического развития страны был принят в 1928 году. Необходимость директивного и точного планирования кредита определялось укреплением плановости во всём народном хозяйстве [20, л. 175].

В связи с этим Средне-Волжский областной акционерный коммунальный банк принял решение не выдавать ссуды, которые не запланированы в работе организации [20, л. 138]. Кредитная система должна была финансировать пятилетний план развития хозяйства региона [20, л. 179]. На банки возлагалась функция контроля за использованием кредитов по назначению.

В случае нарушения заёмщиком условий договора по использованию кредита он подвергался уголовной ответственности [22, л. 11]. При неуплате заёмщиком срочных по ссуде платежей на последние начислялась пеня в размере 9% в год. При неуплате же очередного платежа банк взыскивал весь долг путём продажи владения с торгов [22, л. 14]. При выдаче ссуды банк требовал информацию о роде занятий заёмщика, из каких источников будет пополняться ссуда, полное описание необходимого ремонта [22, л. 15].

Экономическое совещание Р.С.Ф.С.Р. разработало лимиты на строительство. Размер лимитов определялся в первую очередь климатическими условиями. В марте 1929 года Центральный банк коммунального хозяйства и жилищного строительства определил Средне-Волжскому областному акционерному коммунальному банку размер лимитов: на дом деревянный 13 рублей 50 копеек, на каменный 18 рублей [20, л. 12].

11 октября 1929 года Средне-Волжская область была переименована в Средне-Волжский край в связи с образованием в её составе Мордовской автономной области. Средне-Волжский областной коммунальный банк был переименован в Средне-Волжский краевой коммунальный

банк. Расширение региона как административно-территориальной единицы привело к тому, что возникли трудности в управлении отделениями банка.

В 1930 годы был взят курс на усиление строительства по типовым проектам. Перед Средне-Волжским краевым коммунальным банком встала задача систематического жёсткого воздействия на все категории застройщиков, а также ведение контроля над строительством [11, л. 94 об].

Очень часто строительство велось не по утверждённым проектам. Все эти нарушения устранялись благодаря обследованию строительства на местах инженерно-техническим аппаратом банка. Инженерно-технический аппарат банка должен был:

1) проверять качество составленных проектов строительства и его чёткое целевое назначение;

2) устанавливать соответствие представленных проектов установленным требованиям.

Любые отступления от утверждённого Средне-Волжским краевым коммунальным банком проекта должны были быть обоснованы [11, л. 97].

22 мая 1931 года на заседании совета Средне-Волжского краевого коммунального банка были назначены члены оценочных комиссий по правлению банка и его филиалам. По правлению банка был назначен М.П. Мордовин, по Ульяновскому отделению – Башуров, по Пензенскому отделению – Ломовцев, по Оренбургскому отделению – Волчков, по Мордовскому отделению – Вишняков, по Сызранскому отделению – Кузнецов [11, л. 100–101 (об)]. Оценочная комиссия должна была давать заключения по представленным в Средне-Волжский краевой коммунальный банк ходатайствам о ссуде, оценивать предполагаемое строительство, составлять акт осмотра законченного строительства, возведённого на ссуду банка, и делать заключение об оценке строительства. Эта оценка не должна была превышать нормы оценок, установленных Центральным банком коммунального

хозяйства и жилищного строительства [23, л. 243].

Таким образом, в 1924 – 1927 годах в стране были созданы условия для развития кредитно-банковской системы. Задачи, поставленные руководством страны, определялись в связи с курсом на индустриализацию.

После территориальной реорганизации Поволжья и создания Средне-Волжского края Средне-Волжский краевой коммунальный банк осуществлял свою деятельность в соответствии с новым курсом, взятым правительством и чётко выполнял требования Центрального банка коммунального хозяйства и жи-

лищного строительства. Работа велась эффективно, о чём свидетельствуют цифры. С 1 октября 1926 г. по 1 октября 1929 г. общая сумма кредитных вложений местных коммунальных банков увеличилась с 397 до 608 млн. руб. За этот же период долгосрочный кредит вырос с 144 до 598 млн. руб. [2, с. 118]. В стране начинается постепенное вытеснение частного сектора из экономики.

Усиление централизации в управлении хозяйственной жизнью страны повлекло за собой изменения кредитно-банковской системы в Самарском регионе.

Библиографический список

1. Черемисинов Г.А. Государственное предпринимательство в отечественной экономике: «узоры» новой экономической политики (20-е годы – начало 30-х годов XX века). Саратов: Саратовский ун-т, 2002. 321 с.
2. Гусаков А.Д., Дымшиц И.А. Денежное обращение и кредит СССР. М.: Госфиниздат, 1951. 307 с.
3. Феклистов А.Г. Финансовая политика органов местной власти Среднего Поволжья в период проведения денежной реформы 1922-1924 годов: автореф. дис. ... канд. ист. наук. Пенза, 2002. 22 с.
4. Гатауллина И.А. Среднее Поволжье в годы Новой экономической политики: автореф. дис. ... канд. ист. наук. Казань, 2009. 40 с.
5. Волосухина Н.И. Финансовая политика советского государства в условиях проведения денежной реформы 1922–1924 гг. (на материалах Нижнего Поволжья): автореф. дис. ... канд. ист. наук. Астрахань, 2012. 19 с.
6. Лаврененко С.И. Финансовая реформа в условиях новой экономической политики (1921 – 1924 гг.): автореф. дис. ... канд. ист. наук. М., 2009. 26 с.
7. Седой Ю.Н. Денежное обращение России в 1914–1924 годы (на материалах Дона, Кубани и Черноморья): автореф. дис. ... канд. ист. наук. Краснодар, 2007. 26 с.
8. Банк России – Самара / под ред. В.Б. Лазуткина. Новосибирск: Деал, 2012. 581 с.
9. Декрет ВЦИК и СНК от 18 янв. 1923 г. о коммунальных банках. Библиотека нормативно-правовых актов Союза Советских Социалистических республик. http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_1494.htm.
10. Центральный государственный архив Самарской области (ЦГАСО). Ф. Р2290. Оп.1. Д.1.
11. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.1. Д.3.
12. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.3. Д.1.
13. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.1. Д.2.
14. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.3. Д.9.
15. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.4. Д.5.
16. Постановление ЦИК и СНК СССР от 15 июня 1927 г. «О принципах построения кредитной системы». Справочная правовая система Консультант Плюс. <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=25710>.
17. Постановление ЦИК и СНК СССР от 15 июня 1927 года «О введении в действие положения о мерах содействия строительству рабочих жилищ». Библиотека нормативно-правовых актов Союза

Советских Социалистических республик.
http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3311.htm.

18. Постановление ЦИК и СНК СССР от 4 января 1928 года «О жилищной политике». Библиотека нормативно-правовых актов Союза Советских Социалистических республик.
http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3349.htm.

19. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.3. Д.2.

20. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.4. Д.1.

21. Самарская летопись: Очерки истории Самарского края с древнейших времен до наших дней. Кн. 3: Самарский край в XX веке (1928 – 1996 гг.). Самара: Самарский ун-т, 1997. 263 с.

22. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.3. Д.7.

23. ЦГАСО Ф.Р2290. Оп.4. Д.10.

Информация об авторах

Банникова Наталья Фёдоровна, кандидат исторических наук, профессор кафедры философии и истории, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: история, отечественная история, история науки и техники.

Самуилова Марина Олеговна, аспирант кафедры философии и истории, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: 991marina@rambler.ru. Область научных интересов: отечественная история.

THE CREDIT BANKING SYSTEM OF SAMARA REGION IN THE 1920s

© 2014 N. F. Bannikova, M. O. Samuilova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article reviews the changes undergone by the bank crediting system in the USSR in the 1920s as exemplified by the activities of the Samara city municipal bank. The main goals of economic development and, primarily, currency circulation under a new economic policy of the Soviet government are emphasized. Attention is focused on the state of the economic system of the region and changes in the functions of the municipal bank in the areas of industry, agriculture, wholesale trade and transport. The relationships between the Central bank of public utilities and residential housing, on the one hand, and regional banks, on the other, as well as the role of the Samara city municipal bank in developing residential housing and public utilities in the region are shown. Special attention is paid to the solution of the problem of assisting housing construction for workers. The right of municipal banks to issue bonded loans is discussed, changes in the operating of regional banks in the late 1920s are determined. The article covers the processes of reorganization of the financial credit system related to the strengthening of economic management centralization and formation of planned economy. Attention is paid to the peculiarities of the activities of Samara city municipal bank after implementing the administrative-territorial reform. The article includes statistical data on the results of the Samara city municipal bank's activities during the period under investigation.

Commercial banks, private sector, crediting, reorganization, public utilities, long-term loans, residential housing.

References

1. Cheremisinov G.A. Gosudarstvennoe predprinimatel'stvo v otechestvennoj ekonomike: «uzory» novej ekonomicheskoj politiki (20s year – nachalo 30s years XX

century) [State business in domestic economy: “patterns” of the new economic policy (1920s – early 1930s)]. Saratov: Saratov University Publ., 2002. 321 p.

2. Gusakov A.D., Dymshic I.A. Denezhnoe obrashhenie i kredit SSSR [Currency circulation and credit of the USSR]. Moscow: Gosfinizdat Publ., 1951. 307 p.

3. Feklistov A.G. Finansovaya politika organov mestnoy vlasti Srednego Povolzh'ya v period provedeniya denezhnoy reformy 1922-1924 godov. Avtoref. dis. kand. ist. nauk [Financial policy of public authorities in the mid- Volga Region during the monetary reform of 1922-1924. Author's abstract of the thesis in historic science]. Penza, 2002. 22 p.

4. Gataullina I.A. Srednee Povolzh'e v gody novoy ekonomicheskoy politiki. Avtoref. dis. kand. ist. nauk [The mid- Volga Region in the years of the New economic policy. Author's abstract of the candidate's thesis in historic science]. Kazan, 2009. 40 p.

5. Volosuhina N.I. Finansovaya politika sovetskogo gosudarstva v usloviyakh provedeniya denezhnoy reformy 1922-1924 gg. (na materialakh Nizhnego Povolzh'ya). Avtoref. dis. kand. ist. nauk [Financial policy of the Soviet state in the conditions of carrying out the monetary reform of 1922-1924 (case studies of the Lower Volga Region). Author's abstract of the candidate's thesis in historic science]. Astrahan, 2012. 19 p.

6. Lavrenko S.I. Finansovaya reforma v usloviyakh novoy ekonomicheskoy politiki (1921 - 1924 gg.). Avtoref. dis. kand. ist. nauk [Financial reform in conditions of the New economic policy (1921 - 1924). Author's abstract of the candidate's thesis in historic science]. Moscow, 2009. 26 p.

7. Sedoj Yu.N. Denezhnoe obrashchenie Rossii v 1914-1924 godu (na materialakh Dona, Kubani i Chernomor'ya). Avtoref. dis. kand. ist. nauk [Monetary circulation in Russia in 1914 - 1924 (case studies of the Don, Kuban and Black Sea regions). Author's abstract of the thesis in historic science]. Krasnodar, 2007. 26 p.

8. Bank Rossii - Samara [Bank of Russia - Samara]. Novosibirsk: Deal Publ., 2012. 581 p.

9. Dekret VTsIK i SNK ot 18 yanv. 1923 g. okommunal'nykh bankakh. Biblioteka normativno-pravovykh aktov Soyuzo So-

vetskikh Sotsialisticheskikh respublik [The decree of CEC (Central Executive Committee) and SNK (Council of People's Commissars) on municipal banks of January 18, 1923]. Available at:

http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_1494.htm (accessed 7 October 2014).

10. Central state archive of Samara region (TSGASO), f. P2290, op. 1, d. 1.

11. TSGASO f. P2290, op. 1, d. 3.

12. TSGASO f. P2290, op. 3, d. 1.

13. TSGASO f. P2290, op. 1, d. 2.

14. TSGASO f. P2290, op. 3, d. 9.

15. TSGASO f. P2290, op. 4, d. 5.

16. Postanovlenie TsIK i SNK SSSR ot 15 iyunya 1927 g. «O printsipakh postroeniya kreditnoy sistemy». Spravochnaya pravovaya sistema Konsul'tant Plyus [Resolution of CEC (Central Executive Committee) and SNK (Council of People's Commissars) of the USSR of June 15, 1927. "On the principles of creation of a credit system"]. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=25710>.

17. Postanovlenie TsIK i SNK SSSR ot 15 iyunya 1927 goda «O vvedenii v deystvie polozheniya o merakh sodeystviya stroitel'stvu rabochikh zhilishch». Biblioteka normativno-pravovykh aktov Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik [Resolution of CEC (Central Executive Committee) and SNK (Council of People's Commissars) of the USSR of June 15, 1927 "On the enactment of regulations on the measures of assisting the construction of workers' dwellings"]. Available at: www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3311.htm.

18. Postanovlenie TsIK i SNK SSSR ot 4 yanvarya 1928 goda «O zhilishchnoy politike». Biblioteka normativno-pravovykh aktov Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik [Resolution of CEC (Central Executive Committee) and SNK (Council of People's Commissars) of the USSR of January 4, 1928 "On the housing policy"]. Available at: http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_3349.htm.

19. TSGASO f. P2290, op. 3, d. 2.

20. TSGASO f. P2290, op. 4, d. 1.

21. Samarskaja letopis': Ocherki istorii Samarskogo kraja s drevnejshih vremen do nashih dnei. Kn. tret'ja: Samarskij kraj v XX veke (1928 – 1996 gg.) [Samara chronicle: Sketches of history of Samara region from the earliest times to this day. Book Three:

Samara region in the XX century (1928 - 1996)]. Samara: Samara University Publ., 1997. 263 p.

22. TSGASO f. P2290, op. 3, d. 7.

23. TSGASO f. P2290, op. 4, d. 10.

About the authors

Bannikova Natalya Fyodorovna, Candidate of Science (History) Professor of the Department of Philosophy and History, Samara State Aerospace University, Russian Federation. Area of research: history, national history, history of science and technology.

Samuilova Marina Olegovna, post-graduate student of the Department of Philosophy and History, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: 991marina@rambler.ru. Area of research: national history.

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского университета)

№ 4 (46)

2014

Корректоры: **Н. С. Куприянова**
Компьютерная вёрстка **Т. А. Ефимова**
Переводчик **Е. И. Безрукова**

Каталожная цена: 1000 руб.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 20,0
Тираж 200. Заказ _____

Отпечатано в издательстве СГАУ
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала
"Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени
академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета)"**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере с одной стороны листа формата А4 в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе (CD, DVD). Каждый экземпляр должен быть подписан всеми авторами и вместе с комплектом документов (см. п. 7) отправлен на адрес редакции журнала «Вестник СГАУ»: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ, ком. 212а, корп. 3А. Тел.: (846) 267-48-41; e-mail: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word, подготовленный по следующим требованиям:

- объём статьи – до 10 страниц формата А4;
- поля текста – по 2,5 см с каждой стороны;
- шрифты – Times New Roman, Symbol;
- междустрочный интервал – одинарный;
- отступ первой строки абзаца – 1 см;
- выравнивание – по ширине страницы;
- страницы должны быть пронумерованы.

Имя файла определяется по фамилии первого автора: **Иванов.doc**.

Замена буквы «ё» на букву «е» в тексте недопустима.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

3.1. Рисунки размещаются как в самом тексте статьи, так и в отдельных файлах. Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG.

Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку; располагается под рисунком, выравнивание – по центру, курсив, кегль – 10 пт. Для ссылки на рисунок по тексту статьи следует использовать сокращение, например, рис. 1.

3.2. Для набора математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 (и выше) или MathType по следующим требованиям:

- буквы латинского алфавита - Times New Roman; курсив, кегль 12 пт;
- буквы греческого алфавита - Symbol; курсив, кегль 12 пт;

Все специальные символы в тексте статьи должны выполняться в математическом редакторе. **Не допускается применение в тексте вставных символов Microsoft Word при наборе математических выражений и формул.**

Формулы следует печатать с новой строки; нумерация формул осуществляется в порядке следования по тексту статьи. Нумеровать следует только формулы, на которые в тексте делаются ссылки. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Допускается разбивка длинных формул на строки; длина формулы в строке строго ограничена – 80 мм.

3.3. Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и номера по порядку; располагается над таблицей, выравнивание – по левому краю, кегль – 10 пт. Для ссылки на таблицу по тексту статьи следует использовать сокращение, например, табл. 1.

Обязательно наличие подрисуночных подписей и подписей к таблицам.

4. Аннотация к статье (на русском и английском языках) должна быть информативной (не содержать общих слов), содержательной (отражать основное

содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Авторское резюме должно описывать основные цели исследования; объяснить методику проведения исследования (без методологических деталей); суммировать наиболее важные результаты и их важность. Рекомендуемый объем аннотации – 150-250 слов.

Аннотация не должна содержать ссылок на литературу и аббревиатуры (если возможно).

Аннотация на английском языке должна содержать англоязычную специальную терминологию по тематике публикации.

5. Библиографический список приводится на русском и английском языках отдельными списками. Требования к оформлению библиографических ссылок учитывают правила ГОСТ 7.0.5-2008.

Литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка. Ссылки на литературные источники в тексте приводятся в квадратных скобках и отделяются запятыми или тире, например, [1-3], [1,2,5].

5.1. Библиографический список на английском языке (References) должен полностью повторять структуру русскоязычного списка. Рекомендуемая схема описания русскоязычных публикаций на английском языке:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык (для русскоязычных книг и монографий название приводится в транслитерации, далее перевод на английский язык в квадратных скобках);
- название русскоязычного источника (транслитерация или английский вариант, если таковой имеется);
- перевод названия источника на английский язык в квадратных скобках (для журналов можно не делать);
- выходные данные с обозначениями на английском языке (том – V., № – no., C. – P.);
- указание на язык статьи (In Russ.) после описания статьи.

5.2. Если русскоязычная публикация имеет переводной вариант (на английском языке), то в английской части библиографии приводятся переводные данные публикации.

5.3. Включение в библиографический список неопубликованных материалов не допускается.

6. В каждой статье должны быть указаны следующие данные **на русском и английском языках** (по структуре оформления рукописи):

- УДК (при необходимости MSC);
- название статьи (12 пт, все буквы прописные жирное начертание);
- инициалы, фамилия автора(ов) (12 пт);
- название организации, город, страна;
- аннотация (10 пт);
- ключевые слова (каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой или точкой с запятой) (10 пт, курсив);
- текст статьи (12 пт) (допускается разбиение текста на разделы: Введение, ..., Заключение);
- библиографический список (References) (заголовки 12 пт, жирное начертание);
- информация об авторах: учёная степень, учёное звание, должность (с указанием подразделения), организация; электронная почта (e-mail); область научных интересов.

6.1. Если авторы работают в разных организациях, то принадлежность указывается с помощью надстрочного знака: ^{1, 2}. Если авторы работают в одной организации, оцифровка индексами фамилий и организации не требуется.

6.2. Англоязычный блок, содержащий название статьи, ФИО авторов, наименование организации, аннотацию, ключевые слова, библиографический список, информацию об авторах, приводится отдельным разделом после информации об авторах на русском языке.

7. К тексту статьи прилагается комплект сопроводительных документов:

- направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ) на фирменном бланке, подписанное её руководителем или заместителем по научной работе, заверенное печатью;
- отзыв специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы));
- акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати;
- контактная информация: фамилия, имя, отчество (полностью) на каждого автора; адрес для переписки и телефон (не публикуются в журнале).

8. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

9. При подготовке аннотации и оформлении библиографического списка на английском языке рекомендуется использовать следующие методические материалы:

Кириллова О.В. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. М., 2013. 90 с.,

(http://shkola.neicon.ru/images/documents/1_kirillovaredprep_2013.pdf)

- раздел 3.3 – «Авторское резюме и ключевые слова на английском языке»;
- раздел 3.4 – «Списки литературы в латинице - References».

УДК 535.42

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ШАРОВ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

© 2013 С. Н. Хонина, А. В. Устинов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено формирование сферических распределений интенсивности на основе встречной интерференции острогофокусированных вихревых пучков с различной поляризацией. Формирование трёхмерных распределений осуществляется простым способом с помощью оптимизации ширины и положения одной кольцевой диафрагмы. Для узкой диафрагмы оптимальные параметры вычисляются аналитически, а для широкой диафрагмы – дополнительно численно корректируются. Показано, что в зависимости от поляризации, порядка вихревой сингулярности и дополнительного фазового набег в одном из пучков можно формировать как цельные, так и полые световые шары субволнового радиуса, состоящие из различных компонентов электрического поля.

(Текст аннотации)

Острая фокусировка, встречная интерференция, трёхмерное субволновое распределение интенсивности, поляризация, вихревая фазовая функция.

Формирование заданных трёхмерных распределений интенсивности острогофокусированного лазерного излучения актуально в задачах оптического захвата и манипулирования, микроскопии и записи данных.

(Текст статьи)

Библиографический список

1. Хонина С.Н., Вологовский С.Г. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, №1. С. 58-68.
2. Хонина С.Н., Устинов А.В. Формирование тонкой световой трубки при острой фокусировке азимутально-поляризованного излучения // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 6. С. 279-284.
3. Sheppard C.J.R., Gong W., Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy. // Micron. – 2011. V. 42. P. 353–359.
4. ...

Информация об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

Устинов Андрей Владимирович, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: andr@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, разработка программ оптического моделирования, обработка изображений.

FORMATION OF LIGHT BALLS ON THE BASIS OF INTERFERENCE OF ONCOMING FINE-FOCUSED BEAMS WITH DIFFERENT POLARIZATIONS

© 2013 S. N. Khonina, A. V. Ustinov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper deals with the formation of spherical intensity distributions on the basis of the interference of oncoming fine-focused vortex beams with different polarization. The formation of three-dimensional distributions is accomplished in a simple way by optimizing the width and position of a single annular diaphragm. The optimum parameters are analytically estimated for a narrow ring aperture, while those for a broad diaphragm are further numerically corrected. It is shown that, depending on the polarization, the order of the vortex singularity and an additional phase advance in one of the beams both solid and hollow light balls of a subwavelength radius consisting of different components of the electric field can be formed.

(Text of abstract)

Sharp focusing, interference of oncoming beams, three-dimensional subwavelength intensity distribution, polarization, vortex phase function.

References

1. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Control by contribution of components of vector electric fields in focus of a high-aperture lens by means of binary phase structures // *Computer Optics*, 2010. V. 34, no. 1. P. 58-68. (In Russ.)
2. Khonina S.N., Ustinov A.V. Forming of the thin light tube at sharp focusing of azimuthally-polarized radiation // *Izv. SNC RAN*, 2012. V. 14, no 6. P. 279-284. (In Russ.)
3. Sheppard C.J.R., Gong W. Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy // *Micron*, 2011. V. 42. P. 353–359.
4. ...

About the authors

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: khonina@smr.ru. Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

Ustinov Andrey Vladimirovich, Postgraduate Student of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: andr@smr.ru. Area of research: diffractive optics, software design for optical modeling, image processing.