

ISSN 1998-6629

ВЕСТНИК

САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА

№ 1 (14)

2008

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЁВА

№ 1 (14)

2008

Главный редактор
В. А. Сойфер

Заместитель главного редактора
Е. В. Шахматов

Ответственный секретарь
А. Г. Прохоров

Редакционная коллегия
Г. П. Аншаков, В. Л. Балакин, В. А. Барвинок, В. П. Бездухов,
В. Д. Богатырёв, Ф. В. Гречников, Н. Л. Казанский, А. Н. Кирилин,
В. А. Комаров, А. Н. Коптев, В. С. Кузьмичёв, С. В. Лукачёв,
В. А. Михеев, В. С. Павельев, М. Н. Пиганов, С. А. Прохоров,
С. В. Фалалеев, В. П. Шорин

Журнал входит в утверждённый ВАК Минобрнауки РФ Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук, и рекомендован экспертными советами: по машиностроению; по энергетике; по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи; по управлению, вычислительной технике и информатике.

Журнал включён в общероссийский каталог ОАО "Роспечать". Подписной индекс - 18264.

© Самарский государственный аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34
Тел.: (846) 267 48 41
Электронная почта: vest@ssau.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЫБОР ФОРМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ СПУСКА В РАЗРЕЖЕННОЙ АТМОСФЕРЕ МАРСА <i>В. С. Асланов, А. С. Ледков</i>	9
УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ КОЛЕБАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА <i>В. С. Асланов, Н. Р. Стратилатов</i>	16
ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО САМОЛЁТА-РАЗГОНЩИКА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ <i>В. Л. Балакин, А. А. Бебяков, А. Г. Кочян</i>	23
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ ГТД <i>С. К. Бочкарёв</i>	33
ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГТД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ <i>С. К. Бочкарёв, А. Я. Дмитриев</i>	37
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГТД ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ <i>С. К. Бочкарёв, В. В. Мосоулин</i>	40
ПРИБЛИЖЁННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЁТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ МАЛОЙ ТЯГИ. ЧАСТЬ II <i>В. В. Салмин, В. В. Васильев, С. А. Иишков, В. А. Романенко, В. О. Соколов, О. Л. Старинова, В. В. Юрин</i>	45
СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПТИМИЗАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МИССИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МАЛОЙ ТЯГОЙ <i>О. Л. Старинова</i>	68
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ <i>С. Н. Тиц</i>	80
СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ <i>С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов</i>	92
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА	
ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ <i>В. А. Барвинок, Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. П. Самохвалов, В. М. Вершигоров</i>	97

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ <i>В. А. Барвинок, Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. П. Самохвалов, В. М. Вершигоров</i>	103
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ <i>С. В. Белокуров</i>	111
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ <i>А. М. Гареев</i>	121
РАЗРЕШАЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ РАСЧЁТА ТОНКОСТЕННЫХ МНОГОСТРИНГЕРНЫХ КЕССОНОВ С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ <i>О. Р. Кузнецов</i>	128
ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ГЛАДКОЙ ДЕТАЛИ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ <i>В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, Е. А. Денискина, О. Ю. Семёнова</i>	139
ВЛИЯНИЕ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ <i>Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. М. Вершигоров</i>	147
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПИТАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ <i>Д. Е. Рыбальченко, Е. В. Шахматов, Г. О. Белов, В. Н. Илюхин</i>	152
МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ ГРУППЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ <i>А. В. Салтыков</i>	162
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ С НЕСКВОЗНЫМ РАЗРЕЗОМ-ТРЕЩИНОЙ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПО СХЕМАМ ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ <i>С. Л. Степанов</i>	168
ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КОНСОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЁТОМ ДЕФОРМАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА <i>М. В. Сухотерин</i>	174
<u>ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ</u>	
АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЗИЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОПТРОННЫХ СТРУКТУРАХ <i>С. А. Матюнин, М. В. Степанов</i>	181

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

- МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И МОНТАЖА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ СКРЫТОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ**
В. А. Барвинок, Ю. С. Клочков, М. В. Любимов 186
- МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА РЕШЕНИЙ НА ИТЕРАЦИЯХ ПОИСКА В ЧИСЛЕННЫХ ВЕКТОРНЫХ СХЕМАХ**
С. В. Белокуров 196
- МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ ПОМОЩИ ЭКИПАЖУ**
А. А. Воронцов 201
- АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИИ**
Л. С. Зеленко, В. В. Варфоломеева, В. Ю. Кузнецов, А. В. Федькаев, А. В. Терентьев, А. К. Буряк 208
- МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**
А. Н. Коптев, Д. С. Ергалиев, К. Ж. Саханов 219
- ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ НЕКАНОНИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ**
С. Н. Перов, Ю. В. Скворцов 226
- МЕТОДИКА ВЫБОРА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ С УЧЁТОМ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**
В. В. Рыжаков, М. В. Кузнецова, М. В. Рыжаков 236
- АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛЬНОСТИ И РАЗМЕРНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ДОКУМЕНТООБОРОТА**
И. Н. Хаймович 243
- ПРОЦЕДУРНЫЕ ПРАВИЛА РАЗРАБОТКИ И СОГЛАСОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
И. Н. Хаймович, А. И. Хаймович 248

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ В 1971-1975 г.г.**
А. В. Придаткин 253
- ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПРОДУКТА В АСПЕКТЕ ПОСТУЛАТОВ ЛОГИСТИКИ И ТЕОРИИ ПРЕДМЕТА ТРУДА**
Т. Н. Соснина 261

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

CHOOSING THE FORM OF SPACE VEHICLE DESIGNED FOR DESCENT IN THE RAREFIED ATMOSPHERE OF MARS <i>V. S. Aslanov, A. S. Ledkov</i>	9
ORBITAL TETHER SYSTEM MOTION EQUATIONS CONSIDERING SPACE VEHICLE VIBRATIONS <i>V. S. Aslanov, N. R. Stratilatov²</i>	16
OPTIMIZING THE PROPULSION OF A HYPERSONIC ACCELERATOR AIRCRAFT OF A TWO-STAGE AEROSPACE SYSTEM <i>V. L. Balakin, A. A. Bebyakov, A. G. Kotchyan</i>	23
PARAMETER MEASUREMENT QUALITY CONTROL IN AUTOMATED TESTING OF SERIES GAS TURBINE ENGINES <i>S. K. Botchkaryov</i>	33
IDENTIFICATION OF A GAS TURBINE ENGINE MATHEMATICAL MODEL BY THE RESULTS OF TESTING <i>S. K. Botchkaryov, A. Ya. Dmitriyev</i>	37
AUTOMATED RESTORATION OF GAS TURBINE ENGINE CHARACTERISTICS BY EXPERIMENTAL DATA <i>S. K. Botchkaryov, V. V. Mosoulin</i>	40
APPROXIMATE METHODS OF CALCULATING OPTIMAL FLIGHTS OF SPACE VEHICLES WITH LOW-THRUST ENGINES. PART II. <i>V. V. Salmin, V. V. Vassiliev, S. A. Ishkov, V. A. Romanenko, V. O. Sokolov, O. L. Starinova, V. V. Yurin</i>	45
SYSTEM OF ARTIFICIAL INTELLECT SUPPORT OF LOW-THRUST SPACECRAFT INTERPLANETARY MISSION OPTIMIZATION <i>O. L. Starinova</i>	68
DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL OF AIRCRAFT HONEYCOMB SANDWICHES <i>S. N. Tits</i>	80
STRUCTURAL MODEL OF INDIVIDUAL FORECASTING OF SPACE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT PARAMETERS <i>S. V. Tyulevin, M. N. Piganov</i>	92
<hr/> MECHANICAL AND POWER ENGINEERING SCIENCES <hr/>	
CHOICE OF MATERIALS FOR MAKING INDUCTOR SYSTEMS <i>V. A. Barvinok, Yu. Ye. Palamartchuk, A. N. Kirilin, V. P. Samokhvalov, V. M. Vershigorov</i>	97

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THERMAL FIELDS IN INDUCTOR SYSTEM UNDER MAGNETIC PULSE FORMING <i>V. A. Barvinok, Yu. Ye. Palamartchuk, A. N. Kirilin, V. P. Samokhvalov, V. M. Vershigorov</i>	103
MODELLING OF A MUNICIPAL TRANSPORT ROUTE NETWORK <i>S. V. Belokurov</i>	111
MODELLING CHANGES OF CONDITION OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM WORKING FLUID <i>A. M. Gareyev</i>	121
SOLVING EQUATIONS OF THIN-WALLED MULTISTRINGER TORSION BOX DESIGN IN VIEW OF GEOMETRICAL NON-LINEARITY <i>O. R. Kuznetsov</i>	128
IMPACT OF SMOOTH PART RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION ON ADDITIONAL STRESSES IN CASE OF LEADING SURFACE PLASTIC DEFORMATION <i>V. F. Pavlov, V. A. Kirpichyov, Ye. A. Deniskina, O. Yu. Semyonova</i>	139
THE EFFECT OF INDUCTOR SYSTEMS ON THE EFFICIENCY OF MAGNETIC PULSE FORMING <i>Yu. Ye. Palamartchuk, A. N. Kirilin, V. M. Vershigorov</i>	147
MATHEMATICAL MODEL OF SEQUENTIAL FEEDERS FOR CENTRALIZED LUBRICATION SYSTEMS <i>D. Ye. Rybaltchenko, Ye. V. Shakhmatov, G. O. Belov, V. N. Ilyukhin</i>	152
METHOD OF CALCULATING CURRENTS OF A GROUP OF PARALLEL ELECTRIC ARC STEEL MELTING FURNACES <i>A. V. Saltykov</i>	162
ELASTIC-AND-PLASTIC PROBLEM FOR A THIN PLATE WITH A NON-THROUGH CRACK CUT FOR THE CASE OF LOCALIZED STRAIN ACCORDING TO RIGID PLASTIC FLOW SCHEMES <i>S. L. Stepanov</i>	168
RECTANGULAR CANTILEVER PLATE BENDING WITH REGARD TO TRANSVERSE SHEAR DEFORMATION <i>M. V. Sukhoterin</i>	174
ELECTRONICS, MEASURING DEVICES, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION	
<hr/>	
ANALYSIS OF THE ERROR OF NON-LINEARITY OF POSITIONAL CHARACTERISTICS OF A DISPLACEMENT TRANSDUCER ON MULTICOMPONENT OPTRONIC STRUCTURES <i>S. A. Matyunin, M. V. Stepanov</i>	181

CONTROL, COMPUTATIONAL EQUIPMENT AND INFORMATION SCIENCE

METHOD OF ASSESSING THE QUALITY OF PRODUCTION PROCESSES AND MOUNTING OF TECHNICAL SYSTEMS CONSIDERING LATENT CONSUMER <i>V. A. Barvinok, Yu. S. Klotchkov, M. V. Lyubimov</i>	186
MODELS AND ALGORITHMS OF CHOOSING SOLUTIONS ON SEARCH ITERATIONS IN NUMERICAL VECTOR SCHEMES <i>S. V. Belokurov</i>	196
MODEL OF KNOWLEDGE IN THE EXPERT SYSTEM OF AID TO THE CREW <i>A. A. Vorontsov</i>	201
COMPUTER-AIDED-DESIGN SYSTEM FOR CALCULATING ADSORPTION THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS <i>L. S. Zelenko, V. V. Varfolomeyeva, V. Yu. Kuznetsov, A. V. Fed'kayev, A. V. Terentyev, A. K. Buryak</i>	208
MODELLING THE ARCHITECTURE OF A SYSTEM CONTROLLING THE CONDITION OF MAINTENANCE OBJECTS <i>A. N. Koptev, D. S. Yergaliyev, K. Zh. Sakhanov</i>	219
RANDOM PROCESS PRESENTATION BY NON-CANONICAL DECOMPOSITION <i>S. N. Perov, Yu. V. Skvortsov</i>	226
METHOD OF CHOOSING ALGORITHMS FOR ASSESSING THE DEGREE OF CORRESPONDENCE OF OBJECTS TO THEIR FUNCTIONAL PURPOSE WITH REGARD TO THEIR EFFICIENCY AND METROLOGICAL CHARACTERISTICS <i>V. V. Ryzhakov, M. V. Kuznetsova, M. V. Ryzhakov</i>	236
ANALYSIS OF INDUSTRIAL SUBJECT AREA STABILITY AND DIMENSIONALITY CHARACTERISTICS USING AUTOMATED SYSTEMS OF DOCUMENT TURNOVER <i>I. N. Khaimovitch</i>	243
PROCEDURE RULES OF PRESS FORGING BUSINESS PROCESS DEVELOPMENT AND COORDINATION <i>I. N. Khaimovitch, A. I. Khaimovitch</i>	248
<hr/> HUMANITIES <hr/>	
ENGINEERING CREATIVE WORK OF MACHINE BUILDERS IN THE MIDDLE VOLGA REGION IN 1971 – 1975 <i>A. V. Pridatkin</i>	253
PRODUCT LIFE CYCLE IN THE ASPECT OF POSTULATES OF LOGISTICS AND LABOUR OBJECT THEORY <i>T. N. Sosnina</i>	261

ВЫБОР ФОРМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ СПУСКА В РАЗРЕЖЕННОЙ АТМОСФЕРЕ МАРСА

© 2008 В. С. Асланов, А. С. Ледков

Самарский государственный аэрокосмический университет

Статья посвящена выбору формы и положения центра масс космического аппарата с целью исключения резонанса, возникающего при неуправляемом спуске в разреженной атмосфере Марса. Рассматриваются космические аппараты малого удлинения затупленной формы, состоящие из конической и сферической части. С помощью ударной теории Ньютона в аналитическом виде получен критерий отсутствия резонанса. Даны практические рекомендации по выбору формы космического аппарата, исключающие возможность появления резонанса.

Неуправляемое движение, спуск, космический аппарат, бигармоническая моментная характеристика, угол атаки, метод Ньютона

Формулировка задачи

Для эффективного торможения при спуске в разреженной атмосфере Марса используются космические аппараты (КА) малого удлинения затупленной формы [1, 2, 3], напоминающие зонтик или фару. Тела такой формы в аэродинамическом смысле могут иметь три балансирующих положения по пространственному углу атаки [4]: устойчивые - в окрестности 0 и p , неустойчивое - в промежуточном положении $a_* \in (0, p)$. Наличие трёх балансирующих положений может привести к появлению трёх возможных областей движения на фазовом портрете, разделённых сепаратрисой [4]. Переход из одной области в другую в силу внешних возмущений (например, изменения скоростного напора) сопровождается значительным возрастанием или уменьшением пространственного угла a , что можно классифицировать как резонанс. Избежать этого явления можно путём выбора формы КА и положения его центра масс или соответствующих начальных условий движения [5].

Решение задачи

Будем аппроксимировать коэффициент восстанавливающего момента относительно центра масс КА бигармонической зависимостью от пространственного угла атаки [4]:

$$m_a(a) = a \sin a + b \sin 2a. \quad (1)$$

Резонанс возникает при пересечении сепаратрисой фазовой траектории, разделяющей три возможные области движения [5]. Очевидно, что для его устранения необходимо обеспечить отсутствие сепаратрисы, а значит и седловой точки на фазовом портрете системы. В [5] дано необходимое условие отсутствия седловой точки:

$$|b| \leq 0.5|a|. \quad (2)$$

Очевидно, что если неравенство (2) выполняется, то функция $m_a(a)$ обращается на отрезке $[0, p]$ в ноль лишь в двух точках: $a = 0$ и $a = p$ (рис. 1).

Аэродинамические характеристики осесимметричного КА, как правило, задают с помощью трёх зависимостей от угла атаки: коэффициента тангенциальной силы c_t , ко-

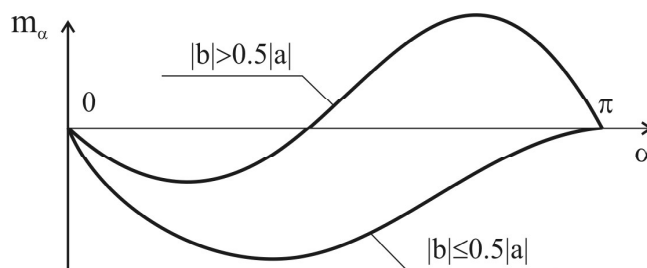


Рис. 1. Зависимость коэффициента восстанавливающего момента от угла атаки

эффицента нормальной силы c_n и положения центра давления [6]. Часто вместо координаты центра давления используют коэффициент момента m_o относительно передней кромки КА. В первом случае коэффициент восстанавливающего момента относительно центра масс КА определится формулой

$$m_a = -c_n(\bar{x}_D - \bar{x}_{ЦМ}), \quad (3)$$

где $x_D, x_{ЦМ}$ - координаты центра давления и центра масс КА относительно носика; $\bar{x}_D = x_D / L, \bar{x}_{ЦМ} = x_{ЦМ} / L$; L - характерная длина КА. Во втором случае

$$m_a = m_o + c_n \bar{x}_{ЦМ}, \quad (4)$$

$$\text{где } m_o = -c_n \bar{x}_D. \quad (5)$$

Согласно (4) значения $\bar{x}_{ЦМ} = 0;1$ определяют границы области, в которой может лежать график функции $m_a(a)$ для всех $\bar{x}_{ЦМ} \in (0;1)$ (рис. 2). Если нижняя граница указанной области $m_o(a) = m_a(a)|_{\bar{x}_{ЦМ}=0}$ лежит ниже оси абсцисс на интервале $a \in (0,p)$, то, очевидно, можно найти такое значение $\bar{x}_{ЦМ}$, что кривая $m_a(a)$ тоже будет лежать ниже оси абсцисс на том же интервале. В этом случае на фазовом портрете системы будет от-

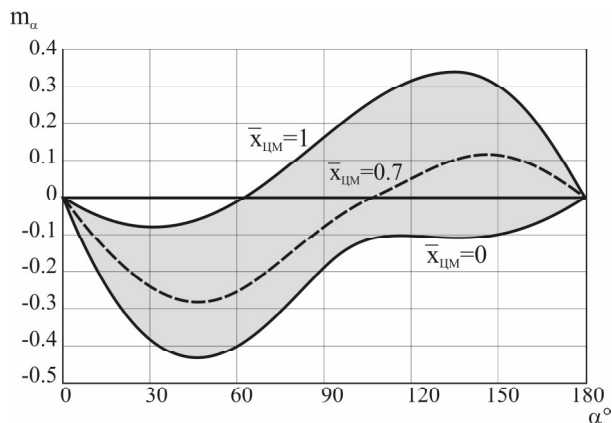


Рис. 2. Область, ограничивающая возможные положения графиков функции $m_a(a, \bar{x}_{ЦМ})$

сутствовать седловая точка, что исключает возможность появления резонанса.

Рассмотрим КА, состоящий из лобового сферического сегмента, конического сегмента и плоского дна (рис. 3). Аппараты подобной конфигурации использовались в европейских и американских марсианских программах: Mars Exploration Rover (Spirit, Opportunity), Mars Express (Beagle2), Phoenix Mars Mission [1, 2, 3]. В качестве варьируемых геометрических параметров будем использовать \bar{h}_1 - относительный радиус наименьшего сечения конической части, \bar{L}_c - относительную длину лобовой сферической части, \bar{L}_k - относительную длину конической части. Все параметры отнесены к диаметру КА D , равному $2h_2$ (рис. 3). Введём ограничения: $0 \leq \bar{h}_1 < 0.5, \bar{L}_k > 0, 0 < \bar{L}_c \leq 0.5$.

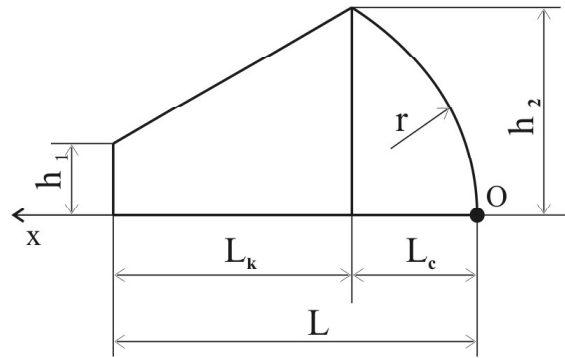


Рис. 3. Конфигурация спускаемого аппарата

Для определения аэродинамических коэффициентов воспользуемся ударной теорией Ньютона, которая для гиперзвуковых скоростей в разреженной среде даёт хорошо согласуемые с экспериментальными данными результаты [6]. На рисунках 4-6 показаны полученные методом Ньютона зависимости для аппаратов типа Beagle2, Spirit и Phoenix для граничных значений центровок: $\bar{x}_{ЦМ} = 0;1$.

Если производные функции $m_o(a)$ по a в точках $a = 0$ и $a = p$ имеют разный знак

$$\left. \frac{dm_o(a)}{da} \right|_{a=0} \cdot \left. \frac{dm_o(a)}{da} \right|_{a=p} < 0, \quad (6)$$

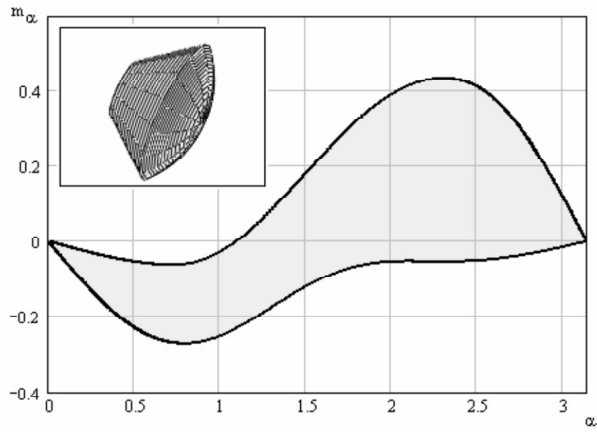


Рис. 4. Область, ограничивающая возможные положения графиков функции $m_a(a, \bar{x}_{ЦМ})$ для аппарата Beagle2

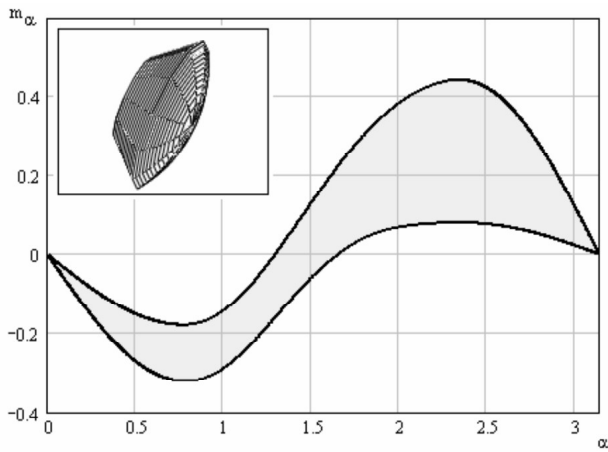


Рис. 5. Область, ограничивающая возможные положения графиков функции $m_a(a, \bar{x}_{ЦМ})$ для аппарата Spirit Lander

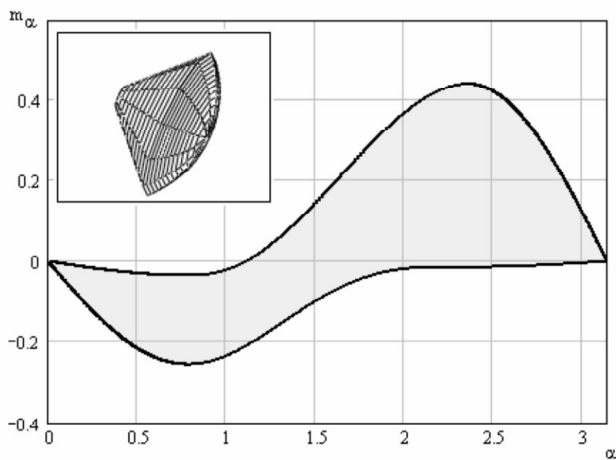


Рис. 6. Область, ограничивающая возможные положения графиков функции $m_a(a, \bar{x}_{ЦМ})$ для аппарата Phoenix

то нижняя граница области для аппарата рассматриваемой конфигурации имеет только два балансирующих положения равновесия: $a = 0$ и $a = p$.

При расчёте аэродинамических коэффициентов по методу Ньютона в окрестности точки $a = 0$ учитывается влияние только лобовой части аппарата, поскольку коническая и донная части находятся в области аэродинамической тени. В окрестности точки $a = p$ учитывается влияние только конической части, поскольку донная не создаёт нормальной аэродинамической силы, а сферическая находится в области аэродинамической тени.

Воспользовавшись методом Ньютона, запишем следующие выражения в окрестности точек $a = 0, p$ [6]:

$$m_O(a)|_{a=0} = -\frac{k}{D^2} \frac{2h_2^4}{Lr} \cos a \sin a, \quad (7)$$

$$m_O(a)|_{a=p} = \frac{k(M) \sin(2a)(h_2 - h_1)L_k}{D^2 2L((h_2 - h_1)^2 + L_k^2)} \times \left(\frac{(h_2 + 2h_1)L_k^2}{3} + \frac{2(h_1^3 - h_2^3)}{3} + L_k L_c (h_2 + h_1) \right), \quad (8)$$

где $k(M)$ - коэффициент давления торможения за прямым скачком уплотнения. Найдём производную функции (7) по углу атаки в точке $a = 0$:

$$\frac{dm_O(a)}{da} \Big|_{a=0} = -\frac{k}{D^2} \frac{2h_2^4}{Lr} < 0.$$

Эта производная всегда отрицательная (то есть положение равновесия $a = 0$ всегда устойчиво), и поэтому условие (6) запишется следующим образом:

$$\frac{dm_O(a)}{da} \Big|_{a=p} > 0. \quad (9)$$

Тогда условие отсутствия третьего баланси- ровочного положения (6) с учётом (8) и (9) после преобразований приобретает вид

$$f_0(L_c, L_k, h_1) = (h_2 + 2h_1)L_k^2 + 2(h_1^3 - h_2^3) + 3L_k L_c (h_2 + h_1) > 0 \quad (10)$$

Поверхность $f_0(L_c, L_k, h_1) = 0$ разбивает про- странство трёх переменных (L_c, L_k, h_2) на две части. Все точки, лежащие ниже этой повер- хности, соответствуют космическим аппара- там, имеющим три балансируемых поло- жения равновесия, независимо от положений их центров масс. Пример такого аппарата показан на рисунке 5. Для всех точек, лежа- щих выше этой поверхности, отсутствия тре- тьего балансируемого положения равнове- сия можно добиться изменением положения центра масс КА. На рис. 7 показаны сечения поверхности $f_0(L_c, L_k, h_1) = 0$ плоскостями, параллельными плоскости (L_k, h_1) .

Покажем, что для аппарата данной кон- фигурации невозможен случай, когда вся об- ласть, ограничивающая возможные положе- ния графиков функции $m_a(a, \bar{x}_{ЦМ})$ (рис. 2), лежит ниже оси абсцисс. Воспользуемся фор- мулой (4) и, приняв $\bar{x}_{ЦМ} = 1$, запишем выра- жения, аналогичные (7) и (8), для верхней границы области:

$$m_a(a) \Big|_{\substack{a=0 \\ \bar{x}_{ЦМ}=1}} = \frac{k}{D^2} \frac{2h_2^4 (L-r)}{Lr^2} \cos a \sin a, \quad (11)$$

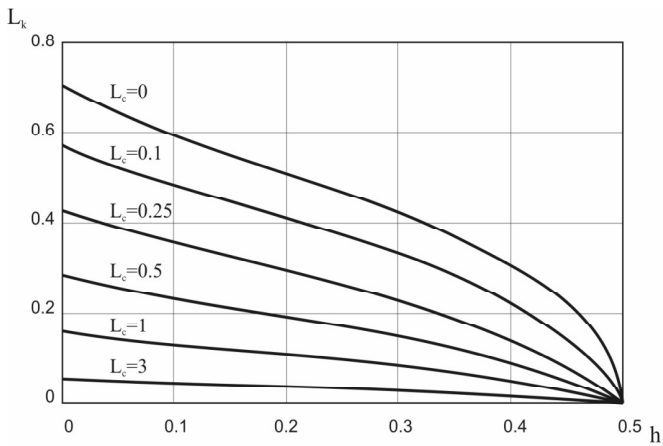


Рис. 7. Сечения поверхности $f(L_c, L_k, h_2) = 0$ плоскостями, параллельными плоскости (L_k, h_1)

$$m_a(a) \Big|_{\substack{a=p \\ \bar{x}_{ЦМ}=1}} = -\frac{k(M) \sin(2a)(h_2-h_1)L_k}{D^2 6L((h_2-h_1)^2 + L_k^2)} (2(h_2^3 - h_1^3) + (2h_2 + h_1)L_k^2) \quad (12)$$

Чтобы верхняя граница области m_a ле- жала ниже оси абсцисс, необходимо

$$\frac{dm_a(a)}{da} \Big|_{\substack{a=0 \\ \bar{x}_{ЦМ}=1}} = \frac{k}{D^2} \frac{2h_2^4 (L-r)}{Lr^2} < 0,$$

то есть $L < r$. Тогда условием существования двух балансируемых положений равнове- сия будет выражение

$$\frac{dm_a(a)}{da} \Big|_{\substack{a=p \\ \bar{x}_{ЦМ}=1}} > 0.$$

Вычисляя производную (12) в точке $a = p$ и выполняя преобразования, получим

$$f_1(L_c, L_k, h_1) = -2(h_2^3 - h_1^3) - (2h_2 + h_1)L_k^2 > 0. \quad (13)$$

Поскольку для рассматриваемой configura- ции $h_2 > h_1$, то $f_1(L_c, L_k, h_1) < 0$ при любых значениях параметров L_c, L_k, h_2 . Значит усло- вие (13) никогда не выполняется, и верхняя граница области всегда имеет участок, лежа- щий выше оси абсцисс.

Таким образом, при выборе формы КА конфигурации, приведённой на рисунке 3, в целях устранения резонанса можно рекомен- довать с тыльной стороны использовать вы- тянутый конус с достаточно большим радиу- сом h_1 , а с лобовой – сферическую повер- хность наименьшего возможного радиуса r , центр масс КА сместить ближе к точке О.

Численное моделирование

Для моделирования движения КА вос- пользуемся системой дифференциальных уравнений, приведённой в [5]:

$$\ddot{\mathbf{a}} + F(\mathbf{a}, z) = \mathbf{e}\Phi_a(\mathbf{a}, \mathbf{z}), \quad \ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{e}\Phi_z(\mathbf{a}, z),$$

$$F(\mathbf{a}, z) = \frac{(G - R \cos a)(R - G \cos a)}{\sin^3 a} - \frac{qSL}{I} m_a(a).$$

Здесь e - малый параметр, $q = rV^2/2$ - скоростной напор, S - площадь миделя, L - характерная длина, I - момент инерции, Φ_z - функция правых частей, $z = (V, H, q, R, G)$ - вектор медленно меняющихся параметров, V - скорость, q - угол наклона траектории, H - высота полёта, R и G - с точностью до множителя проекции вектора кинетического момента на продольную ось КА и на направление скорости движения.

Рассмотрим движение гипотетического КА (рис. 4) с массой 70 кг, имеющего следующие геометрические параметры:

$$\bar{r} = 0.75, \quad \bar{h}_2 = 0.5, \quad \bar{h}_1 = 0.2, \quad \bar{L}_k = 0.381, \\ \bar{L}_c = 0.191, \quad \bar{x}_{ЦМ} = 0.7$$

и коэффициенты:

$$a = 0.11, \quad b = -0.19.$$

В качестве начальных условий движения примем: $\alpha_0 = 20^\circ$, $\dot{\alpha}_0 = 0$, $R_0 = 0.2 \text{ с}^{-1}$, $G_0 = 0.7 \text{ с}^{-1}$, $V_0 = 5000 \text{ м/с}$, $q_0 = -15^\circ$, $H_0 = 1.2 \cdot 10^5 \text{ м}$.

На рис. 8 показана зависимость угла атаки от времени, а также огибающие угла атаки, полученные с помощью расчётной

процедуры, приведённой в [5]. В момент времени $t = 23 \text{ с}$ наступает резонанс - фазовая траектория пересекает сепаратрису, переходя из неустойчивой внешней области движения в одну из внутренних. В данном случае фазовая траектория попала в верхнюю область движения. Огибающая нижней области, в которую также могла попасть фазовая траектория, показана на рисунке пунктиром.

Избежать резонанса можно, изменив размеры и положение центра масс КА. Увеличим радиус наименьшего сечения конической части КА ($h_1 = 0.21$) и переместим центр масс ближе к точке О ($\bar{x}_{ЦМ} = 0.4$). Методом Ньютона найдём зависимость $m_a(a)$. Раскладывая её в нечётный ряд Фурье, получим коэффициенты: $a = -0.42$, $b = -0.18$. Результаты численного моделирования показывают, что в течение всего спуска колебания пространственного угла атаки происходят вокруг единственного устойчивого положения равновесия $a = 0$ (рис. 9), и резонанс не возникает.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (06-01-00355а).

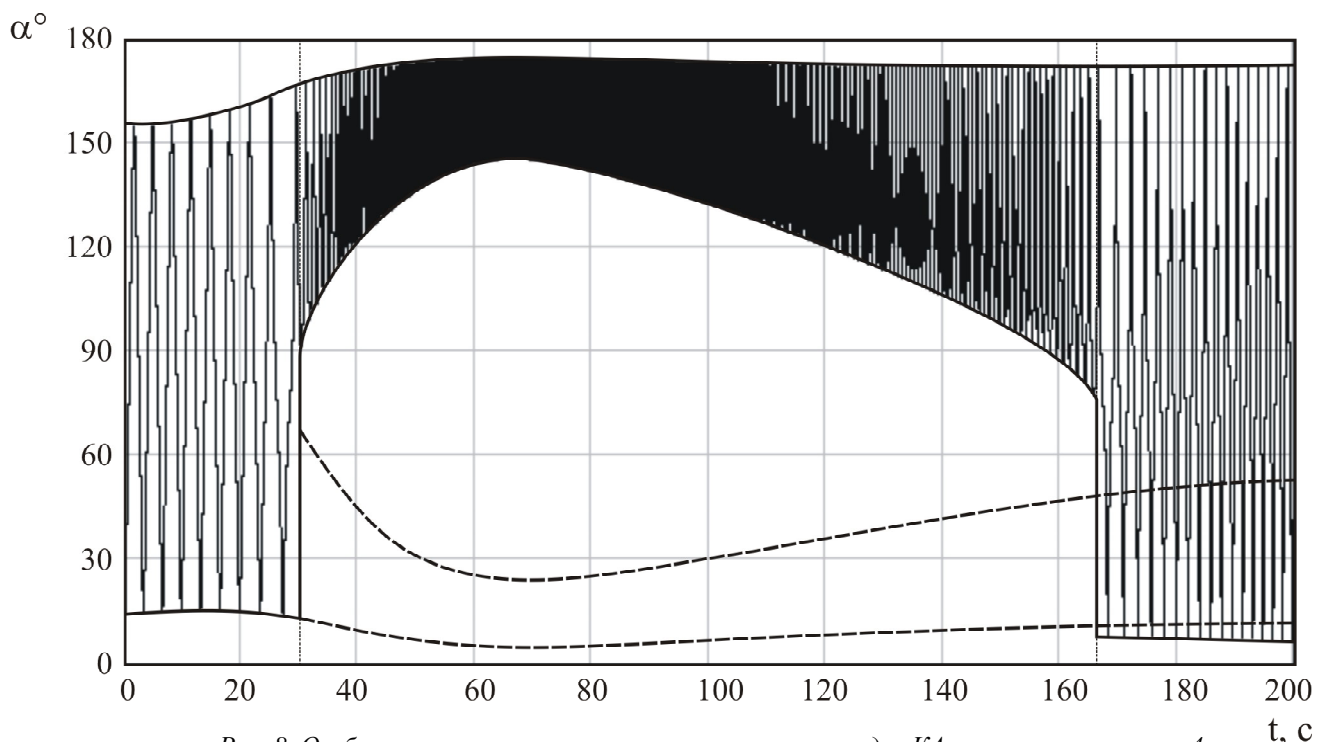


Рис. 8. Огибающие зависимости угла атаки от времени для КА, показанного на рис. 4

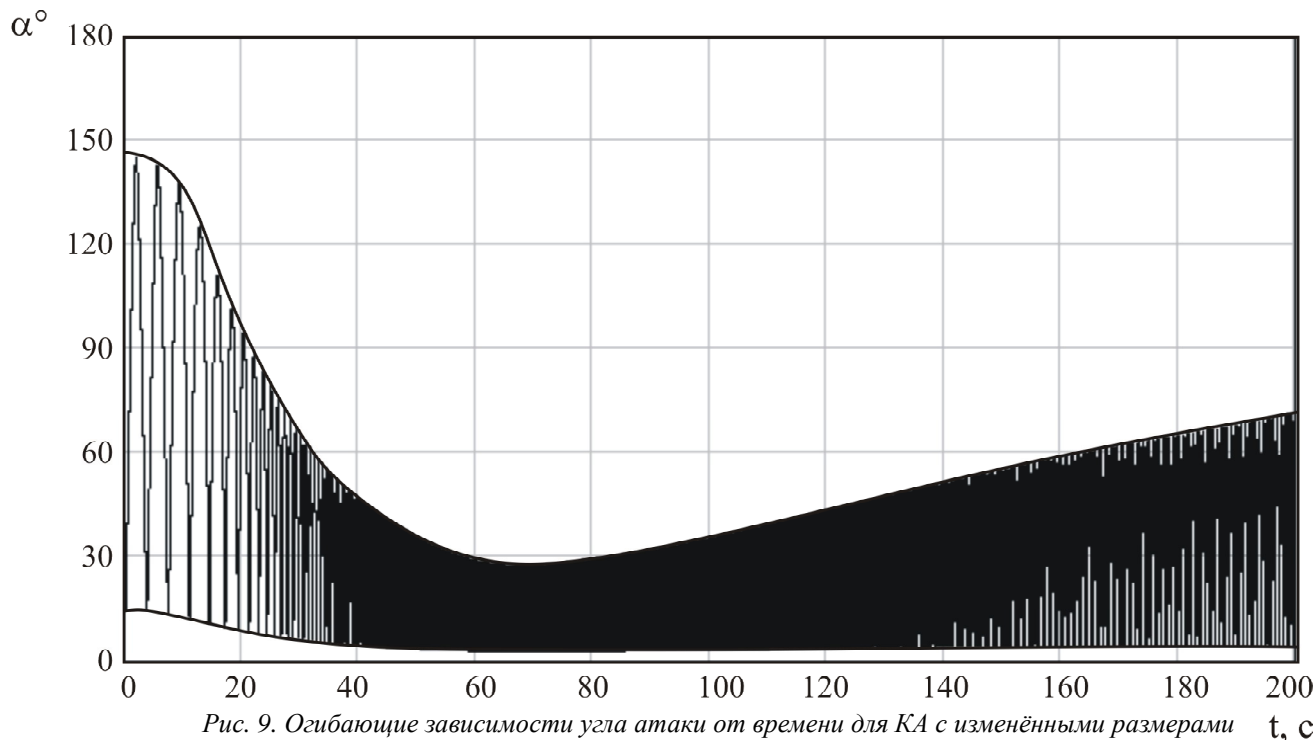


Рис. 9. Огибающие зависимости угла атаки от времени для КА с изменёнными размерами t, c

Библиографический список

1. Wilson, A. ESA SP-1240 : Mars Express: the scientific payload [Текст]/ A. Wilson, A. Chicarro. - ESA Publications Division, 2004.- 216 p. ISBN 92-9092-556-6.
2. Phoenix Mars Mission [Электронный ресурс]. - <http://phoenix.lpl.arizona.edu/>.
3. Mars Exploration Rover Mission [Электронный ресурс]. - <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft.html>.
4. Асланов, В. С. Пространственное движение тела при спуске в атмосфере

[Текст]/В. С. Асланов. - М.: Физматлит, 2004. - 164 с.

5. Асланов, В. С. Особенности вращательного движения КА при спуске в атмосфере Марса [Текст]/ В. С. Асланов, А. С. Ледков//Космические исследования. - 2007. Т. 45, №4. - С. 351-357.

6. Аржаников, Н. С. Аэродинамика летательных аппаратов: учебник для студентов авиационных специальностей вузов [Текст] / Н. С. Аржаников, Г. С. Садекова. - М.: Высшая шк., 1983.- 359 с.

References

1. Andrew Wilson, Agustin Chicarro «ESA SP-1240: Mars Express: the scientific payload»: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 2004, 216 p.
2. Phoenix Mars Mission - <http://phoenix.lpl.arizona.edu/>.
3. Mars Exploration Rover Mission - <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission.html>.
4. Aslanov, V. S. Three-dimensional motion of a body during the descent in the atmosphere/. V. S. Aslanov. - Moscow: Phismat-

lit, 2004 - 164 pp.

5. Aslanov, V. S. Peculiarities of a space vehicle's rotary motion during the descent in the atmosphere of Mars./ V. S. Aslanov, A. S. Ledkov// Space Investigations (Kosmitcheskiye issledovanya) - 2007. V. 45, No. 4. - pp. 351-357.

6. Arzhanikov, N. S. - Aerodynamics of space vehicles: text-book for students of aviation specialities of higher educational institutions/. N. S. Arzhanikov, G. S. Sadekova. - Moscow, Vyshaya shkola (Higher school), 1983 - 359 pp.

CHOOSING THE FORM OF SPACE VEHICLE DESIGNED FOR DESCENT IN THE RAREFIED ATMOSPHERE OF MARS

© 2008 V. S. Aslanov, A. S. Ledkov

Samara State Aerospace University

The paper deals with choosing the form and centre of inertia position of a space vehicle with a view to eliminating resonance which occurs during unguided descent in the rarefied atmosphere of Mars. Blunted small-elongation space vehicles consisting of a conical part and a spherical one are discussed. The criterion of absence of resonance is obtained analytically with the help of Newton's shock theory. Practical recommendations on choosing the form of a space vehicle are given to eliminate the possibility of resonance arising.

Unguided motion, descent, space vehicle, biharmonic moment characteristic, angle of attack, Newton's method.

Информация об авторах

Асланов Владимир Степанович, заведующий кафедрой теоретической механики СГАУ, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: динамика движения космических аппаратов и соосных тел, космические тросовые системы.

Ледков Александр Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры теоретической механики СГАУ. Область научных интересов: неуправляемое движение космических аппаратов в разреженной среде, космические тросовые системы.

Aslanov, Vladimir Stepanovitch, head of department "Theoretical mechanics", SSAU, Doctor of Technical Science, professor. Area of research: Dynamics of motion of space vehicles and coaxial bodies, space tether systems.

Ledkov, Alexander Sergeyevitch, post-graduate student, assistant of the department "Theoretical mechanics", SSAU. Area of research: unguided motion of space vehicles in rarefied atmosphere, space tether systems.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ КОЛЕБАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2008 В. С. Асланов¹, Н. Р. Стратилатов²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Государственный научно-производственный ракетно-космический центр
«ЦСКБ-Прогресс»

Рассматривается механическая система, включающая в себя космический аппарат (КА), весомый трос и концевой груз. КА представляется как твёрдое тело, совершающее движение центра масс и вокруг центра масс под действием гравитационного момента и момента от силы натяжения троса. С помощью уравнения Лагранжа второго рода получена математическая модель плоского движения представленной механической системы. Показано, что полученная модель может быть использована как для анализа развёртывания тросовой системы, так и для изучения поведения самого КА.

Космический аппарат, трос, орбитальное движение, колебания, уравнения Лагранжа, плоское движение

Формулировка проблемы

Анализу космических тросовых систем посвящены многочисленные научные работы, например [1-11], в которых объектами исследований являлись трос, полезный груз и КА. Орбитальные тросовые системы могут применяться для различных задач перемещения полезной нагрузки в космическом пространстве, в том числе и для доставки полезной нагрузки на поверхность Земли. В этом случае могут реализовываться два способа развёртывания тросовой системы: статический и динамический [4, 8]. При динамическом развёртывании трос выпускается быстрее, чем при статическом развёртывании, и под действием кориолисовой силы капсула отклоняется от вертикали, а затем, после того как трос развёрнут на полную длину, начинается возвратное движение капсулы к вертикали. Переменная по величине и направлению сила натяжения троса создаёт дополнительный момент, под действием которого КА совершает нестационарные колебания относительно центра масс, что в свою очередь приводит, например, к возникновению нежелательных дополнительных микроускорений [12] при отказе системы ориентации и при её работе [13]. В известных математических моделях космических тросовых систем [1-11] КА рассматривается как мате-

риальная точка, и это обстоятельство не позволяет использовать их для анализа движения самого КА как твёрдого тела.

В предлагаемой работе считается, что КА представляет собой твёрдое тело, совершающее движение центра масс и вокруг центра масс под действием гравитационной силы, гравитационного момента и момента от силы натяжения троса. Выбор той или иной физической модели системы «КА + трос с концевым модулем» обусловлен режимами её движения и целями исследований. Физическую модель будем определять следующим образом. КА задан как твёрдое тело с главными осями инерции; центр масс КА и точка выпуска в процессе развёртывания троса или точка крепления, когда трос уже выпущен, не совпадает с центром масс КА. Длина троса изменяется, масса троса пропорциональна длине. Концевой модуль – материальная точка. Математическая модель будет составлена с помощью корректного и весьма эффективного метода – уравнения Лагранжа второго рода [14]. Следует учесть, что сила натяжения троса, как правило [8], представляется управлением и является непотенциальной. Математическая модель должна быть достаточно простой, легко интерпретируемой, сохранять основные особенности физической модели и отражать основные закономернос-

ти движения системы. Это позволит проверить основные предположения по поведению системы.

Кинетическая энергия системы

При выводе уравнений движения будем пренебрегать гибкостью троса. Единственная сила, действующая на трос – гравитационная сила. Аэродинамической силой и солнечным давлением будем пренебрегать. На концах троса находятся КА массой m_1 и груз - материальная точка массой m_2 . В качестве обобщённых координат примем: $q_1 = r = OC$ - расстояние между центром Земли и центром масс системы C (рис. 1), $q_2 = l$ - длина троса, $q_3 = J$ - угол истинной аномалии центра масс системы, $q_4 = j$ - угол отклонения троса относительно линии OC , $q_5 = a$ - угол отклонения оси КА O_1x_1 относительно троса. Согласно процедуре Лагранжа составим выражение для кинетической энергии системы, в данном случае в виде суммы четырёх слагаемых:

$$T = T_C + T_l + T_{TC} + T_{КА}, \quad (1)$$

где T_C - кинетическая энергия центра масс системы; T_l - кинетическая энергия, связанная с удлинением троса; T_{TC} - кинетическая

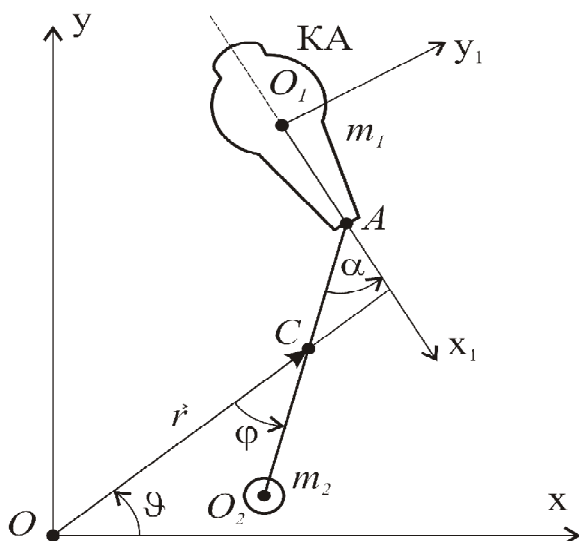


Рис. 1. КА с тросовой системой

энергия вращения весоного троса и двух материальных точек O_1 и O_2 массой, соответственно, m_1 и m_2 относительно центра масс системы C ; $T_{КА}$ - кинетическая энергия относительного вращения КА. При записи выражения для кинетической энергии (1) предполагалось, что плечо силы натяжения $\Delta = O_1A$ значительно меньше длины троса l .

Поступательная кинетическая энергия соответствует абсолютному движению центра масс системы по орбите и включает в себя радиальную и трансверсальную скорости:

$$T_C = \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r^2 \dot{J}^2), \quad (2)$$

где $m = m_1 + m_2 + m_t$ - полная масса системы, $m_t(l) = rSl$ - масса троса (r - плотность троса, S - площадь поперечного сечения троса), $m_1 = m_1^0 - m_t$ - текущая масса КА, m_1^0 - начальная масса КА.

Кинетическая энергия удлинения троса может быть представлена в виде [15]

$$T_l = \frac{1}{2} \frac{m_1(m_2 + m_t)}{m} \dot{l}^2 = \frac{1}{2} m_t(l) \dot{l}^2, \quad (3)$$

где $m_t(l)$ - редуцированная масса троса.

Кинетическую энергию вращения весоного троса и двух материальных точек O_1 и O_2 запишем следующим образом:

$$T_{TC} = \frac{1}{2} I_C w^2, \quad (4)$$

где I_C - момент инерции тросовой системы (трос и две материальные точки O_1 и O_2) относительно центра масс системы, w - абсолютная угловая скорость вращения гантели. Для выбранных обобщённых координат (рис. 1) выражение для угловой скорости имеет вид

$$w = \dot{J} + j\dot{l}. \quad (5)$$

Момент инерции тросовой системы относительно центра масс C в обобщённых координатах определим в виде четырёх слагаемых:

$$I_C = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \frac{rS}{3}(r_1^3 + r_2^3), \quad (6)$$

где $r_1 = O_1 C \approx AC = \frac{m_2 + \frac{m_t}{2}}{m} l$,

$$r_2 = O_2 C = \frac{m_1 + \frac{m_t}{2}}{m} l.$$

После преобразований и упрощений момент инерции тросовой системы (6) может быть записан в виде [14]:

$$I_C(l) = \left[\frac{(2m_1 + m_t)(2m_2 + m_t)}{4m} - \frac{m_t}{6} \right] l^2 = m_*(l) l^2, \quad (7)$$

где $\delta_*(l)$ - редуцированная масса тросовой системы. Подставим (5) и (7) в (4) и в результате получим кинетическую энергию вращения тросовой системы относительно центра масс:

$$T_{TC} = \frac{1}{2} m_* l^2 (\mathcal{J} + j\mathcal{J})^2. \quad (8)$$

Осталось определить кинетическую энергию вращения КА относительно собственного центра O_1 :

$$T_{KA} = \frac{1}{2} I_z w_{KA}^2 = \frac{1}{2} I_z (\mathcal{J} + j\mathcal{J} + \mathcal{J})^2, \quad (9)$$

где I_x, I_y, I_z - главные моменты инерции КА в связанной системе координат $O_1 x_1 y_1 z_1$ (рис. 1).

Если подставить (2), (3), (8) и (9) в выражение (1), то получим кинетическую энергию системы в виде

$$T = \frac{1}{2} \left[m(\mathcal{R} + r^2 \mathcal{R}) + m_t(l)\mathcal{R} + m_*(l)l^2(\mathcal{J} + j\mathcal{J})^2 + I_z(\mathcal{J} + j\mathcal{J} + \mathcal{J})^2 \right] \quad (10)$$

Потенциальная энергия системы

Потенциальная энергия системы состоит из потенциальной энергии тросовой системы (весомый негибкий трос и две точечные массы на концах O_1 и O_2) [15]

$$\dot{I}_{TC} = -\frac{mm}{r} + \frac{mm_* l^2}{2r^3} (1 - 3\cos^2 j), \quad (11)$$

где m - гравитационный параметр, и потенциальной энергии для твёрдого тела (КА) в центральном поле [16]:

$$\dot{I}_{KA} = \frac{3m}{2r^3} (I_x - I_y) \cos^2 a. \quad (12)$$

Очевидно, что потенциальная энергия тросовой системы и КА как твёрдого тела определяется суммой двух потенциальных энергий (11) и (12):

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_{TC} + \dot{I}_{KA} = \\ &= -\frac{mm}{r} + \frac{mm_* l^2}{2r^3} (1 - 3\cos^2 j) + \\ &+ \frac{3m}{2r^3} (I_x - I_y) \cos^2 a. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнения движения

Для рассматриваемой механической системы определим с помощью (10) и (13) лагранжиан как

$$\begin{aligned} L &= T - \dot{I} = \\ &= \frac{1}{2} \left[m(\mathcal{R} + r^2 \mathcal{R}) + m_t(l)\mathcal{R} + m_*(l)l^2(\mathcal{J} + j\mathcal{J})^2 + I_z(\mathcal{J} + j\mathcal{J} + \mathcal{J})^2 \right] + \\ &+ \frac{mm}{r} - \frac{mm_* l^2}{2r^3} (1 - 3\cos^2 j) - \frac{3m}{2r^3} (I_x - I_y) \cos^2 a. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда уравнение Лагранжа второго рода примет вид [14]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \quad j = \overline{1,5}, \quad (15)$$

$$(q_1 = r, q_2 = l, q_3 = J, q_4 = j, q_5 = a),$$

где Q_j - непотенциальные силы.

Пусть расстояние от центра планеты до центра масс системы значительно больше длины троса и соответствующего радиуса инерции КА: $i_z = \sqrt{I_z / m_1}$. Тогда можно утверждать, что выполняется следующее условие:

$$mr^2 \gg m_* l^2, I_z. \quad (16)$$

Отметим, что лагранжиан системы (14) не зависит от угла истинной аномалии J , который является циклической координатой. В этом случае уравнениям Лагранжа второго рода (15) отвечают четыре дифференциальных уравнения движения второго порядка:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = r \dot{\mathcal{J}}^2 - \frac{m}{r^2} + \frac{3m\bar{m}_* l^2}{2r^4} (1 - 3\cos^2 j) + \\ + \frac{9m}{2mr^4} (I_x - I_y) \cos^2 a, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathcal{J}} = 2 \frac{\dot{\mathcal{J}}}{r} \dot{r} - \frac{1}{m_* l^2} \frac{d(m_* l^2)}{dt} (\dot{j} + \dot{\mathcal{J}}) - \\ - \frac{1}{\bar{I}_z^{-1} + 1} \left(\ddot{\mathcal{J}} - \frac{3m}{(1 + \bar{I}_z) r^3} \sin j \cos j \right), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \frac{3m}{r^3} \frac{I_x - I_y}{I_z} \sin a \cos a - \\ - (\dot{\mathcal{J}})^2 - \frac{P\Delta}{I_z} \sin(a - j) + 2 \frac{\dot{\mathcal{J}}}{r} \dot{r}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \frac{1}{m_l} \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{2} \frac{\partial m_l}{\partial l} \dot{\mathcal{J}}^2 + \left(\frac{\partial m_*}{\partial l} l^2 + 2m_* l \right) [(\dot{\mathcal{J}} + \dot{j})^2 - \frac{m}{r^3} (1 - 3\cos^2 j)] - P \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

и один первый интеграл

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathcal{J}}} = mr^2 \dot{\mathcal{J}} + m_*(l) l^2 (\dot{\mathcal{J}} + \dot{j}) + I_z (\dot{\mathcal{J}} + \dot{j}) = const,$$

где $\bar{m}_*(l) = \frac{m_*(l)}{m}$, $\bar{I}_z = \frac{I_z}{m_* l^2}$, $\Delta = O_1 A$; $P = P(t)$

- сила натяжения троса, используемая, как правило, в качестве управления при развёртывании тросовых систем [8]. Уравнения (17)-(20) получены с учётом условия (16).

Исключим из правых частей уравнений (18) и (19) вторые производные и в результате представим систему уравнений движения

КА с тросовой системой, разрешённую относительно вторых производных:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = r \dot{\mathcal{J}}^2 - \frac{m}{r^2} + \frac{3m\bar{m}_* l^2}{2r^4} (1 - 3\cos^2 j) + \\ + \frac{9m}{2mr^4} (I_x - I_y) \cos^2 a, \\ \ddot{\mathcal{J}} = 2 \frac{\dot{\mathcal{J}}}{r} \dot{r} - \frac{1}{m_* l^2} \frac{d(m_* l^2)}{dt} (\dot{j} + \dot{\mathcal{J}}) - \\ - \frac{3m}{r^3} \left[\sin j \cos j + \frac{I_x - I_y}{m_* l^2} \sin a \cos a \right] + \\ + \frac{P\Delta}{m_* l^2} \sin(a - j), \\ \mathcal{L} = \frac{3m}{r^3} (I_x - I_y) \left(\frac{1}{I_z} + \frac{1}{m_* l^2} \right) \sin a \cos a - \\ - P\Delta \left(\frac{1}{I_z} + \frac{1}{m_* l^2} \right) \sin(a - j) + \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \frac{1}{m_l} \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{2} \frac{\partial m_l}{\partial l} \dot{\mathcal{J}}^2 + \left(\frac{\partial m_*}{\partial l} l^2 + 2m_* l \right) [(\dot{\mathcal{J}} + \dot{j})^2 - \frac{m}{r^3} (1 - 3\cos^2 j)] - P \right\}. \end{aligned}$$

Если центр масс системы движется по круговой орбите ($r = const$), то уравнения движения (21) можно записать в более простом виде:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathcal{J}} = -\frac{1}{m_*} \frac{d(m_* \bar{l}^2)}{dt} (\dot{j} + \dot{\mathcal{J}}) - \\ - \frac{3m}{r^3} \left[\sin j \cos j + (\bar{I}_x - \bar{I}_y) \sin a \cos a \right] + \\ + N \sin(a - j), \\ \mathcal{L} = \left[\frac{3m}{r^3} (\bar{I}_x - \bar{I}_y) \sin a \cos a - N \sin(a - j) \right] (\bar{I}_z^{-1} + 1) + \\ + \frac{1}{m_*} \frac{d(m_* \bar{l}^2)}{dt} (\dot{j} + \dot{\mathcal{J}}) + \frac{3m}{r^3} (\sin j \cos j), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\ddot{r} = \frac{1}{m_t} \times \left\{ -\frac{1}{2} \frac{\partial m_t}{\partial l} \dot{r}^2 + \left(\frac{\partial m_t}{\partial l} \bar{l}^2 + 2m_t \bar{l} \right) \left[(\dot{\theta} + j\dot{\theta})^2 - \frac{m}{r^3} (1 - 3\cos^2 j) \right] - P \right\},$$

где $N = \frac{P\Delta}{m_s l^2}$; $\bar{l} = \frac{l}{r}$ - безразмерная длина

троса; $\bar{I}_x = \frac{I_x}{m_s l^2}$, $\bar{I}_y = \frac{I_y}{m_s l^2}$ - безразмерные

моменты инерции.

Уравнения движения (21) и (22) обобщают известные математические модели, например [9, 12, 15], и позволяют проводить исследование движения космической тросовой системы с учётом поведения КА, троса и концевого груза.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (06-01-00355).

Библиографический список

1. Белецкий, В. В. Динамика космических тросовых систем [Текст]/В. В. Белецкий. - М.: Наука, 1990. - 329 с.

2. Черноушко, Ф. Л. Динамика свертывания космической тросовой системы [Текст]/Ф. Л. Черноушко//Прикладная математика и механика. - 1995. - Т. 59. Вып. 2. - С. 179-187.

3. Алпатов, А. П. Космические тросовые системы. Обзор проблемы [Текст]/А. П. Алпатов, В. И. Драновский, А. Е. Закржевский, А. В. Пироженок, В. С. Хорошилов//Укр. космическая наука и технология. - 1997. - Т. 3. Вып.5 /6. - С. 21-29.

4. Дигнат, Ф. Управление колебаниями орбитальной тросовой системы [Текст]/Ф. Дигнат, В. Шилен//Прикладная математика и механика.-2000. - Т. 64. Вып. 5. - С. 747-754.

5. Сидоров, И. М. Об использовании тросовых систем для создания постоянно действующего транспортного канала в космическом пространстве [Текст]/И. М. Сидоров//Полет. - 2000. - №8. - С. 36-39.

6. Сидоров, И. М. Принципиальная возможность использования тросовых систем для реализации гравитационных маневров в окрестности планеты [Текст]/И. М. Сидоров/

/Докл. Российской академии наук. - 2002. - Т. 384. №4. - С. 483-488.

7. Иванов, В. А. Космические тросовые системы. Некоторые аспекты практического использования [Текст]/В. А.Иванов, С. А.Купреев, М. Р.Либерзон. - М.: СИП РИА, 2005. - 100 с.

8. Zimmermann, F. Optimization of the tether-assisted return mission of a guided re-entry capsule [Текст]/F. Zimmermann, U. M. Schuttle, E. Messerschmid//Aerospace Science and Technology. - 2005. - V. 9. №8. - P. 713-721.

9. Williams, P. Libration In-plane payload capture using tethers [Текст]/P. Williams, C. Blanksby, P. Trivailo, H.A. Fujii//Acta Astronautica. - 2005. - V. 57. - P. 772-787.

10. Сазонов, В. В. Математическое моделирование разворачивания тросовой системы с учетом массы троса. Препр [Текст]/В. В. Сазонов//Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. - 2006. - № 58. - С. 1-36.

11. Асланов, В. С. Пространственное движение космической тросовой системы, предназначенной для доставки груза на Землю [Текст]/В. С. Асланов, А. С. Ледков, Н. Р. Стратилатов//Полет. - 2007. - № 2. - С. 28-33.

12. Асланов, В. С. Колебания тела с орбитальной тросовой системой [Текст]/В. С. Асланов//Прикладная математика и механика. - 2007. - Т. 71. Вып. 6. - С. 1027-1033.

13. Асланов, В. С. Анализ движения космического аппарата с тросовой системой с учетом работы двигателей ориентации [Текст]/В. С. Асланов, Н. Р. Стратилатов//Сборник трудов XIII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара. - 2007. - С. 48-53.

14. Суслов, Г. К. Теоретическая механика [Текст]/Г. К. Суслов. - М.; Л.: Гостехиздат, 1946. - 655 с.

15. Williams, P. Tethered planetary capture: controlled maneuvers [Текст]/P. Williams, C. Blanksby, P. Trivailo//Acta Astronautica. - 2003. - V. 53 - P. 681-708.

16. Белецкий, В. В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле [Текст]/В. В. Белецкий. - М.: Изд. МГУ, 1975. - 308 с.

References

1. Beletsky, V. V. Space tether system dynamics. V. V. Beletsky – Moscow: Nauka, 1990. – 329 pp.
2. Tchernous'ko, F. L. Dynamics of space tether system rolling up. F. L. Tchernous'ko // Applied mathematics and physics – 1995. – Vol. 59. Issue 2. – pp. 179-187.
3. Alpatov, A. P. Space tether systems. Problem survey. A. P. Alpatov, V. I. Dranovsky, A. Ye. Zakrzhevsky, A. V. Pirozhenko, V. S. Khoroshilov / Ukrainian space science and technology. – 1997. – Vol. 3 Issue 5/6. – pp. 21-29.
4. Dignat, F. Control over orbital tether system vibrations. F. Dignat, V. Schilen // Applied mathematics and mechanics. – 2000. – Vol. 64. Issue 5. – pp. 747-754.
5. Sidorov, I. M. Using tether systems for the creation of a permanent transport channel in space. / I. M. Sidorov // Polyot (Flight) – 2000. No. 8. – pp. 36-39.
6. Sidorov, I. M. Basic possibility of using tether systems for carrying out gravitational manoeuvres in the vicinity of a planet. / I. M. Sidorov // Reports of the Russian Academy of Science. – 2002. – Vol. 384. No. 4. – pp. 483-488.
7. Ivanov, V. A. Space tether systems. Some aspects of practical use. / V. A. Ivanov, S. A. Kupreyev, M. R. Liberson – Moscow: SIP RIA, 2005.
8. Zimmermann F., Schottle U.M., Messerschmid E. Optimization of the tether-assisted return mission of a guided re-entry capsule. Aerospace Science and Technology. 2005. v. 9. № 8. p. 713–721.
9. Williams, P., Blanksby, C., Trivailo, P., Fujii, H. A. Libration In-plane payload capture using tethers. Acta Astronautica, Vol. 57, 2005, pp. 772–787.
10. Sazonov, V. V. Mathematical modelling of tether system deployment taking account of tether mass / V. V. Sazonov / Institute of applied mathematics named after M. V. Keldysh, Russian Academy of Science. – 2006 – No. 58. – pp. 1-36.
11. Aslanov, V. S. Three-dimensional motion of a space tether system designed to deliver a load to the Earth / V. S. Aslanov, A. S. Ledkov, N. R. Stratilatov // Polyot (Flight). – 2007. – No. 2. – pp. 28-33.
12. Aslanov, V. S. Vibrations of a body with an orbital tether system. / V. S. Aslanov / Applied mathematics and mechanics. – 2007. – Vol. 71. Issue 6. – pp. 1027-1033.
13. Aslanov, V. S. Analysis of motion of a space vehicle with a tether system taking account of attitude control engine operation. / V. S. Aslanov, N. R. Stratilatov // Transactions of the XIII All-Russian scientific seminar on motion control and aircraft navigation. Samara. – 2007. – pp. 48-53.
14. Suslov, G. K. Theoretical mechanics. / G. K. Suslov – Moscow; Leningrad: Gostekhizdat, 1946. – 655 pp.
15. Williams, P., Blanksby, C., Trivailo, P. Tethered planetary capture: controlled maneuvers. Acta Astronautica, Vol. 53, 2003, pp. 681–708.
16. Beletsky, V. V. Satellite motion relative to the centre of mass in the gravitational field / V. V. Beletsky - Moscow: Moscow State University Publishing House, 1975. – 308 pp.

ORBITAL TETHER SYSTEM MOTION EQUATIONS CONSIDERING SPACE VEHICLE VIBRATIONS

© 2008 V. S. Aslanov¹, N. R. Stratilatov²

¹Samara State Aerospace University

²State Research-and-Production Space Rocket Center “CSDB-Progress”

The paper describes a mechanical system that includes a space vehicle (SV), a tether and end load. The SV is presented as a solid body that executes the motion of and around the centre of inertia under the effect of gravitational moment and tether tension moment. A mathematical model of plane motion of the mechanical system presented is obtained with the help of a Lagrangian equation of the second order. It is shown that the model obtained can be used both for tether system deployment analysis and for the study of the SV behavior.

Space vehicle, tether, orbital motion, vibrations, Lagrangian equations, plane motion.

Информация об авторах

Асланов Владимир Степанович, заведующий кафедрой теоретической механики СГАУ, д.т.н, профессор. Область научных интересов: динамика движения космических аппаратов и соосных тел, космические тросовые системы.

Стратилатов Николай Ремирович, главный конструктор-начальник отделения ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: динамика орбитальных тросовых систем, орбитальное движение космического аппарата.

Aslanov, Vladimir Stepanovitch, head of department “Theoretical mechanics”, SSAU, Doctor of Technical Science, professor. Area of research: dynamics of motion of space vehicles and coaxial bodies, space tether systems.

Stratilatov, Nikolay Remirovitch, chief designer-head of department, State Research-and-Production Space Rocket Center «CSDB-Progress». Area of research: dynamics of orbital tether systems, space vehicle orbital motion.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО САМОЛЁТА-РАЗГОНЩИКА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2008 В. Л. Балакин, А. А. Бебяков, А. Г. Кочян

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается движение гиперзвукового самолёта-разгонщика как первой ступени двухступенчатой авиационно-космической системы. Определены оптимальная и приближённо-оптимальная программы угла атаки из условия минимума затрат топлива. Исследовано влияние величины конечного угла наклона траектории на характер программ управления и траекторий движения.

Авиационно-космическая система, гиперзвуковой самолёт-разгонщик, угол атаки, программа управления, оптимизация.

Возможное создание гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) с комбинированной силовой установкой (КСУ) предусматривает их использование в качестве как маршевых самолётов (ГМС), так и самолётов-разгонщиков (ГСР) – первой ступени двухступенчатой авиационно-космической системы (АКС) [1]. Для ГСР допустимыми считаются так называемые «пологие» (с небольшими значениями углов наклона) траектории. С другой стороны, движение второй (ракетной) ступени АКС вне плотных слоев атмосферы характеризуется большими значениями углов наклона траектории. Поскольку переход с самолётных принципов движения (первая ступень) на ракетные (вторая ступень) должен происходить с минимальными энергетическими затратами, то необходимо определить оптимальные режимы движения ГСР.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Постановка задачи. Объектом управления является ГЛА со стартовой массой 300000 кг, выполненный по схеме «бесхвостка» с крылом двойной стреловидности [1] с ракетно-турбинным пароводородным двигателем (РТДп) и стартовой тяговооружённостью m_0 , равной единице [2]. Аэродинамические характеристики ГЛА и высотно-скоростные характеристики КСУ приняты согласно [1].

Рассматривается форма вариационной задачи Майера, и за критерий оптимизации принята масса израсходованного топлива m_T , определяемая как

$$m_T = m(t_k) - m(t_n), \quad (1)$$

где m – масса; t_n, t_k – моменты времени начала и окончания движения, соответственно.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение ГСР в траекторной системе координат, имеет вид

$$\begin{cases} \dot{h} = \frac{I_{уд}(h, M)b}{m} \cos a - C_{xa}(a, M) \frac{r(h)V^2}{2m} S - g \sin q, \\ \dot{q} = \frac{1}{V} \left(\frac{I_{уд}(h, M)b}{m} \sin a + C_{ya}(a, M) \frac{r(h)V^2}{2m} S - g \cos q \right) + \frac{V \cos q}{R+h}, \\ \dot{r} = V \sin q, \\ \dot{a} = -b. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь V – скорость, q – угол наклона траектории, h – высота, a – угол атаки, b – максимальный секундный расход топлива, M – число Маха, r – плотность атмосферы, S –

площадь крыла, g – ускорение свободного падения, R – радиус Земли, $I_{уд}$ – удельный импульс, C_{xa} , C_{ya} – коэффициенты силы лобового сопротивления и аэродинамической подъемной силы, соответственно.

Обозначим через $\mathbf{x} = \{V, q, h, m\}$ вектор фазовых координат или вектор состояния ГСР.

Граничные условия движения записываются в виде

$$\begin{aligned} t = t_n : V = M_n \cdot a(h_n), q = q_n, h = h_n, m = m_n; \\ t = t_k : V = M_k \cdot a(h_k), q = q_k, h = h_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где a – скорость звука. В начальный момент времени условия движения и максимальная масса соответствуют так называемой типовой траектории [1, 2]: $M_n = 1,921$, $q_n = 13,8^\circ$, $h_n = 11000$ м, $m_n = 290000$ кг.

В качестве функции управления принята программа угла атаки от времени при ограничениях вида

$$a_{\min} \leq a(t) \leq a_{\max},$$

где $a_{\min} = -2^\circ$, $a_{\max} = 10^\circ$ – минимальный и максимальный угол атаки, соответственно [1].

Для гиперзвукового маршевого самолёта с $q_k = 0^\circ$ решение задачи принципом максимума Понтрягина приведено в [3, 4].

Условия движения в конечный момент времени по скорости и высоте определяются границами работоспособности РТДп: $M_{\max} = 6$ и $h_{\max} = 30000$ м. Они являются начальными условиями при моделировании движения второй ступени с целью определения оптимального значения q_k из условия минимума расхода топлива при выводе полезной нагрузки на круговую орбиту высотой 200 км.

Управление движением второй ступени осуществляется по углу тангажа с использованием двухпараметрической линейной программы [5]. Соответствующая краевая задача решается методом Ньютона, сходимость

контролируется по достижению высоты заданной круговой орбиты, интегрирование уравнений движения заканчивается при достижении значения орбитальной скорости. Масса ракетной ступени равна 70000 кг при массе конструкции 10000 кг, тяге 9810 кН и секундном расходе топлива 76 кг/сек. В результате получено, что $q_k = 35^\circ$. Таким образом, для ГСР установлены все значения начальных и конечных условий движения (3).

Решение задачи. Решение трёхпараметрической краевой задачи определения начальных значений переменных сопряжённой системы, соответствующей формализму принципа максимума, проводится методом Ньютона. Остановка итерационного процесса происходит при одновременном выполнении условий:

$$|M_k - M_k^i| \leq e_M, |q_k - q_k^i| \leq e_q, |h_k - h_k^i| \leq e_h,$$

где $e_M = 0,01$, $e_q = 0,1^\circ$, $e_h = 100$ м определяют точность решения краевой задачи по фазовым координатам; i – номер итерации.

Результаты решения краевой задачи показали, что сходимость итерационного процесса для граничного условия $q_k = 35^\circ$ не достигается. Поэтому значение q_k уменьшалось с шагом $\Delta q_k = 5^\circ$ до получения сходящегося итерационного процесса. В результате получено максимально возможное значение угла q_k , равное 10° .

Оптимальная программа угла атаки и фазовые координаты оптимальной траектории показаны на рис. 1 - 4.

На рис. 5 представлены оптимальные траектории движения ГМС и ГСР и имеющееся для ГЛА ограничение по скоростному напору: $q_{\max} = 60$ кПА [1].

Анализ результатов. Оптимальная траектория ГСР, соответствующая $q_k = 10^\circ$ при $M_k = 6$, имеет рикошетирующий характер, скорость возрастает монотонно, и выполняется ограничение по скоростному напору (рис. 2 - 5). При $q_k = 0^\circ$ высота непрерывно возрастает и рикошет отсутствует.

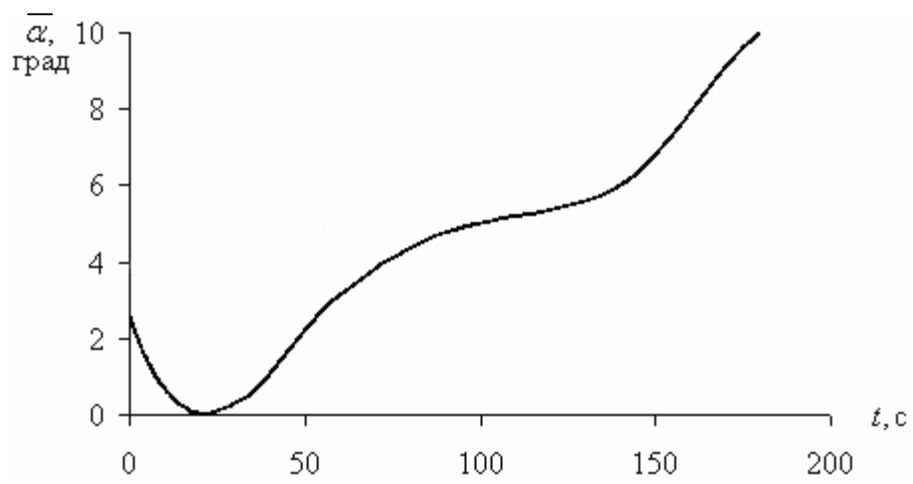


Рис. 1. Оптимальная программа угла атаки

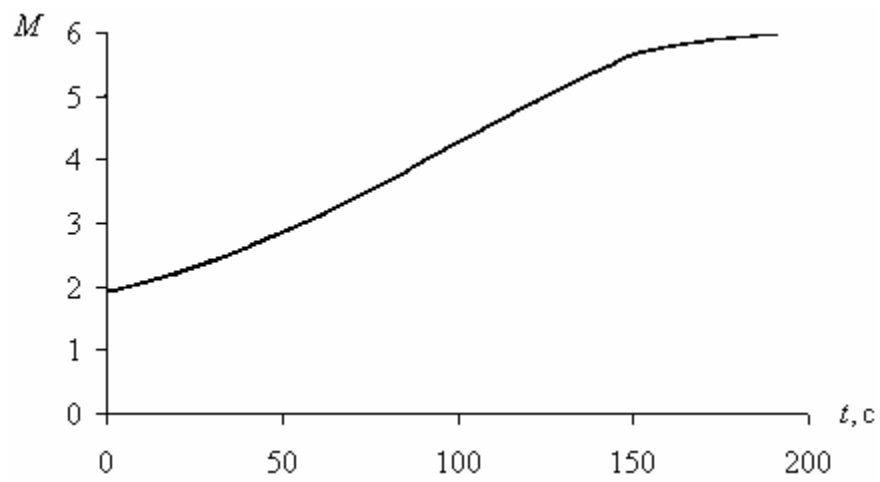


Рис. 2. Изменение числа M от времени

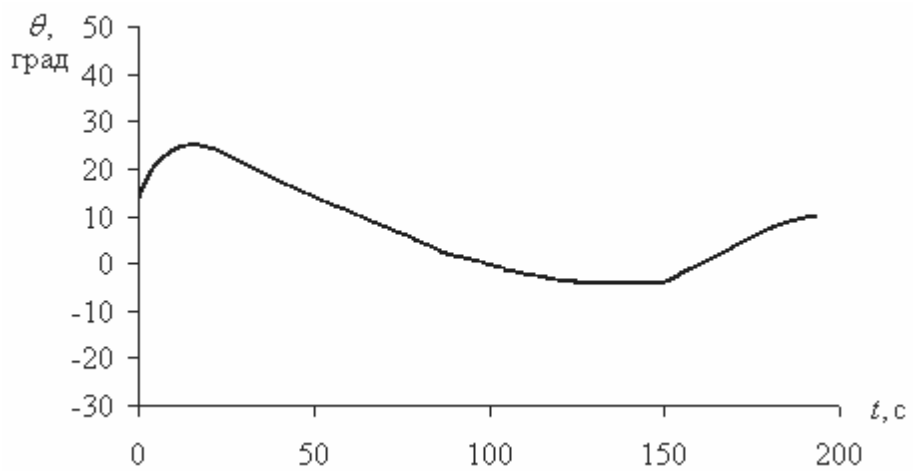


Рис. 3. Изменение угла наклона траектории от времени

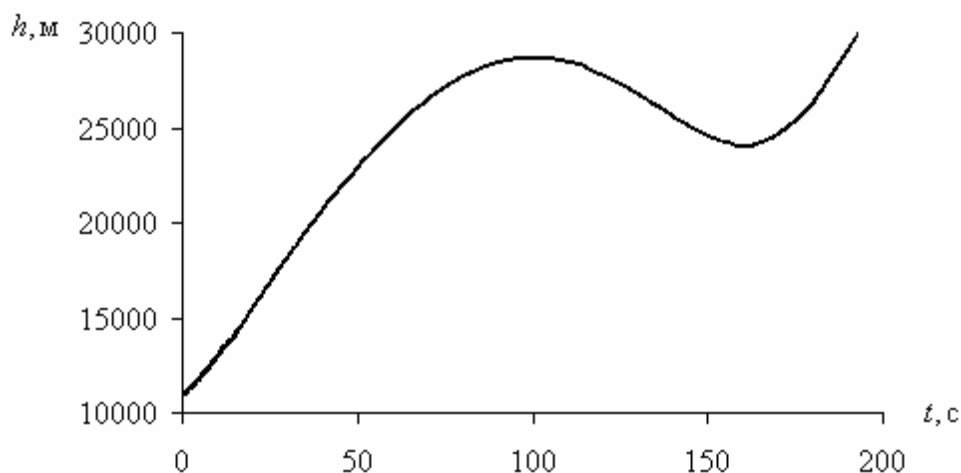


Рис. 4. Изменение высоты от времени

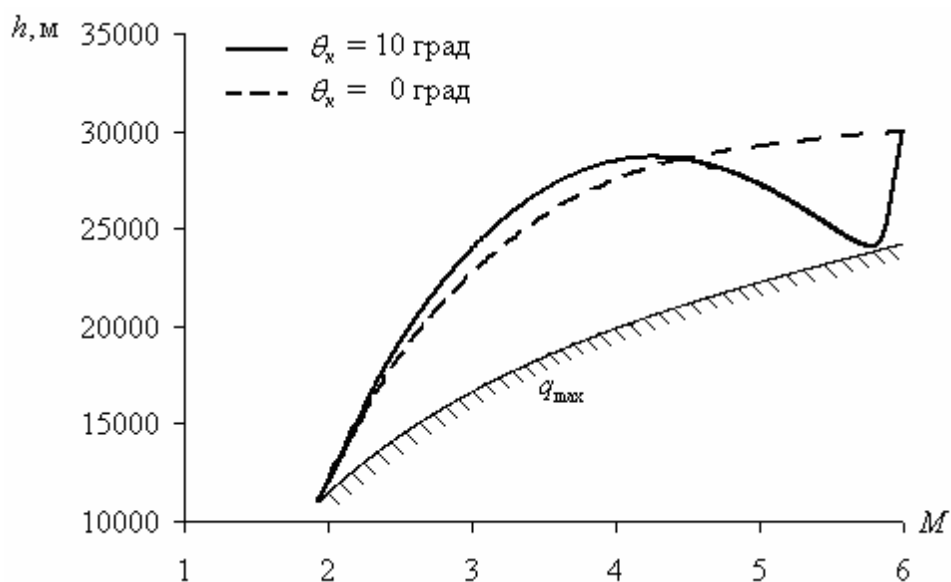


Рис. 5. Оптимальные траектории

Структура программы оптимального управления углом атаки имеет следующие особенности (рис. 1):

- начальное значение угла атаки ($\bar{\alpha}_n \approx 3^\circ$) поддерживает начальный угол наклона траектории для более интенсивного роста высоты с целью наискорейшего выхода из плотных слоёв атмосферы (максимизация скороподъёмности);

- последующее уменьшение угла атаки до малых значений ($\bar{\alpha} \approx 0^\circ$) при движении со сверхзвуковыми скоростями в наиболее плотных слоях атмосферы обеспечивает ми-

нимизацию силы лобового сопротивления, что является более важным, чем поддержание максимальной скороподъёмности;

- «квазирелейный» характер, связанный с переходом на максимальный угол атаки α_{\max} при движении с гиперзвуковой скоростью ($M > 5$) для увеличения аэродинамической подъёмной силы и поддержания после рикошета набора требуемой конечной высоты. Возникающее при этом увеличение силы лобового сопротивления не имеет существенного значения, поскольку движение происходит на больших высотах.

ПРИБЛИЖЁННО-ОПТИМАЛЬНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ УГЛОМ АТАКИ

Решение задачи оптимизации методом принципа максимума имеет известные трудности, связанные с подбором начальных условий для сопряжённой системы. Поэтому после определения структуры оптимальной программы управления целесообразно определить более простую приближённо-оптимальную программу, которую можно использовать в качестве номинальной при управлении движением при наличии возмущений.

Предлагается следующая двухступенчатая программа управления углом атаки, которая сохраняет «квазирелейный» характер оптимальной программы:

$$a = \begin{cases} a_1, & t < t'; \\ a_2, & t \geq t'; \end{cases} \quad (4)$$

где a_1 , a_2 , t' – параметры, подлежащие определению из условия выполнения конечных условий движения по углу наклона траектории q_k , высоте h_k и скорости M_k при минимальных затратах топлива m_T .

Определение параметров программы управления. Параметры a_2 , t' определяются в результате решения методом Ньютона двухпараметрической краевой задачи при фиксированном значении параметра a_1 . Точность решения краевой задачи по углу наклона траектории составляет $0,1^\circ$, по высоте – 5 м, по числу $M - 0,01$.

Параметрический анализ зависимости $m_T(a_1)$ показал, что она имеет минимум на отрезке $[0; 1^\circ]$. При значениях a_1 , больших 1° , параметр a_2 превышает a_{\max} .

Оптимальное с точки зрения затрат топлива значение параметра a_1 определяется с помощью градиентного метода. Для каждого приближения параметра a_1 вычисляются значения параметров a_2 , t' и затраты топлива m_T .

Переход из одной точки в другую в направлении антиградиента осуществляется по формуле

$$a_1^{(s+1)} = a_1^{(s)} - I^{(s)} \left(\frac{\partial m_T(a_1)}{\partial a_1} \right)^{(s)},$$

где s – номер шага, $I^{(s)}$ – величина, характеризующая длину s -го шага.

Величина $I^{(s)}$ определяется на каждом шаге из условия

$$I^{(s)} = \begin{cases} I^{(s-1)}, & m_T(a_1^{(s)}) \leq m_T(a_1^{(s-1)}); \\ \frac{I^{(s-1)}}{2}, & m_T(a_1^{(s)}) > m_T(a_1^{(s-1)}). \end{cases}$$

Условие остановки итерационного процесса: $\frac{\partial m_T(a_1)}{\partial a_1} = 0$.

Определены приближённо-оптимальные программы управления углом атаки (4), обеспечивающие выполнение конечных условий движения ($h_e = 30000$ м, $M_e = 6$, q_e от 0 до 10° с шагом 1°) при минимальных затратах топлива (табл. 1).

На рис. 6 представлены траектории движения ГЛА и ограничение по скоростному напору q_{\max} .

Траектории движения с q_e , большим 3° , имеют рикошетирующий характер. С увеличением значения q_e рикошет усиливается, а при $q_e \geq 7^\circ$ нарушается ограничение по скоростному напору.

Приближённо-оптимальные программы управления углом атаки и фазовые координаты траекторий, удовлетворяющих ограничению на скоростной напор, показаны на рис. 7 - 10.

Анализ результатов. Параметры двухступенчатой программы управления, а именно a_1 , a_2 , t' , увеличиваются для обеспечения роста q_e (табл. 1, рис. 7). Большие значения угла a_1 (большие значения аэродина-

Таблица 1

q_k , град	a_1 , град	a_2 , град	t' , с	t_k , с	m_T , кг
0	0,45	6,00	62,5	162,8	12373
1	0,525	6,28	66,5	162,9	12380
2	0,55	6,32	70,1	163,3	12411
3	0,6	6,44	74,3	163,9	12456
4	0,625	6,41	78	164,5	12502
5	0,7	6,67	83,3	165,5	12578
6	0,75	6,76	88	166,6	12662
7	0,8	6,84	92,8	167,9	12760
8	0,85	6,91	97,5	169,4	12874
9	0,9	7,02	102,2	170,6	12966
10	0,95	6,98	107,2	172,8	13133

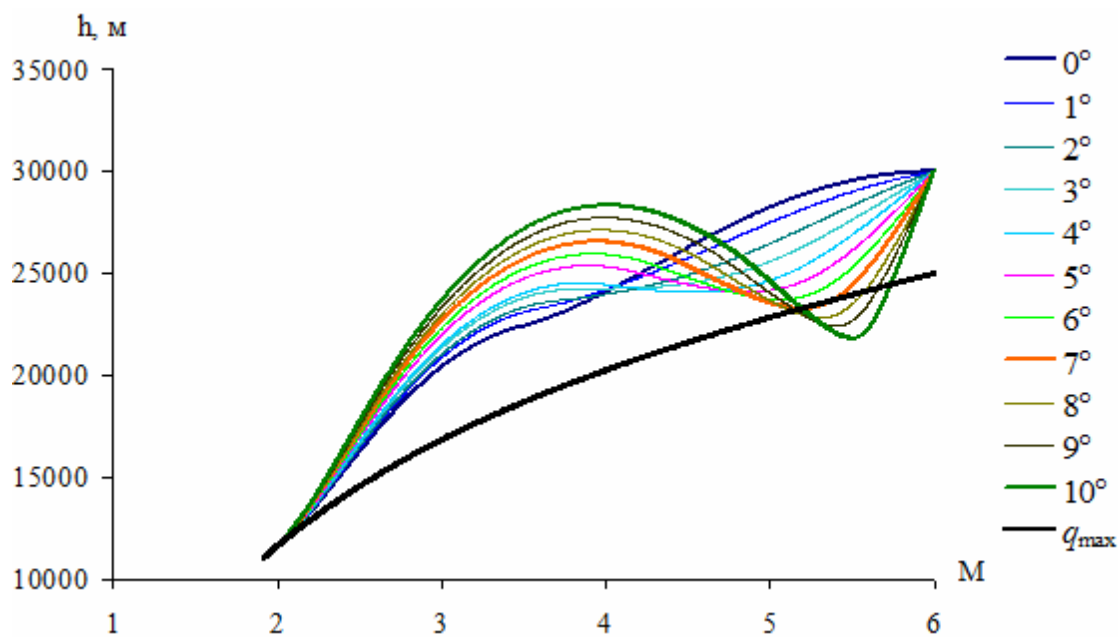


Рис. 6. Приближённо-оптимальные траектории движения

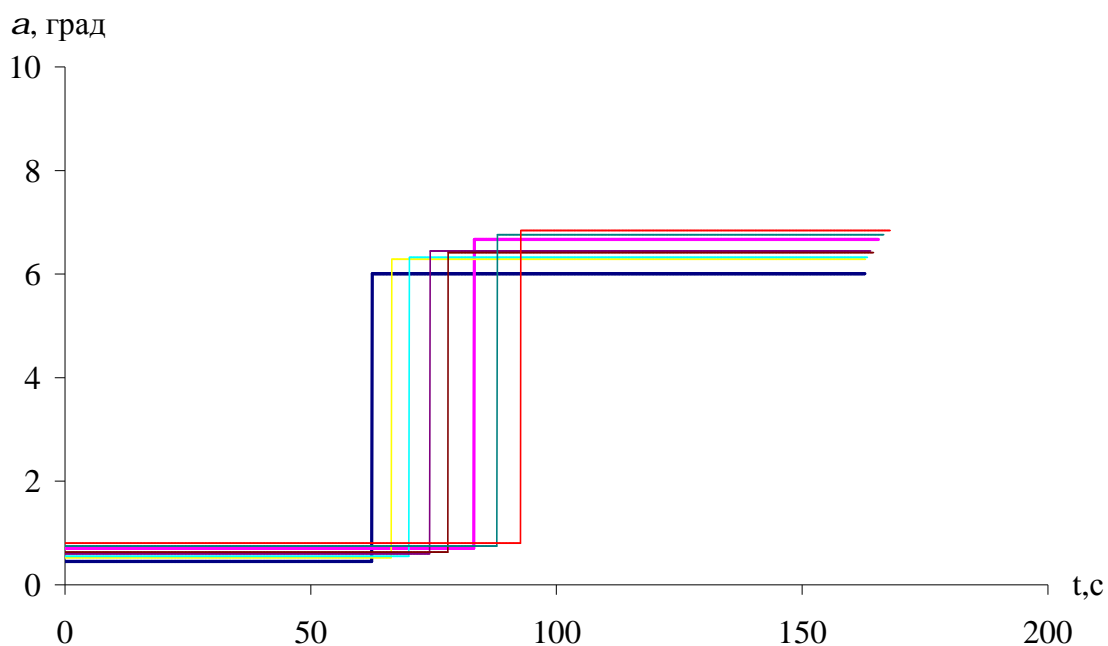


Рис. 7. Приближённо-оптимальная программа управления

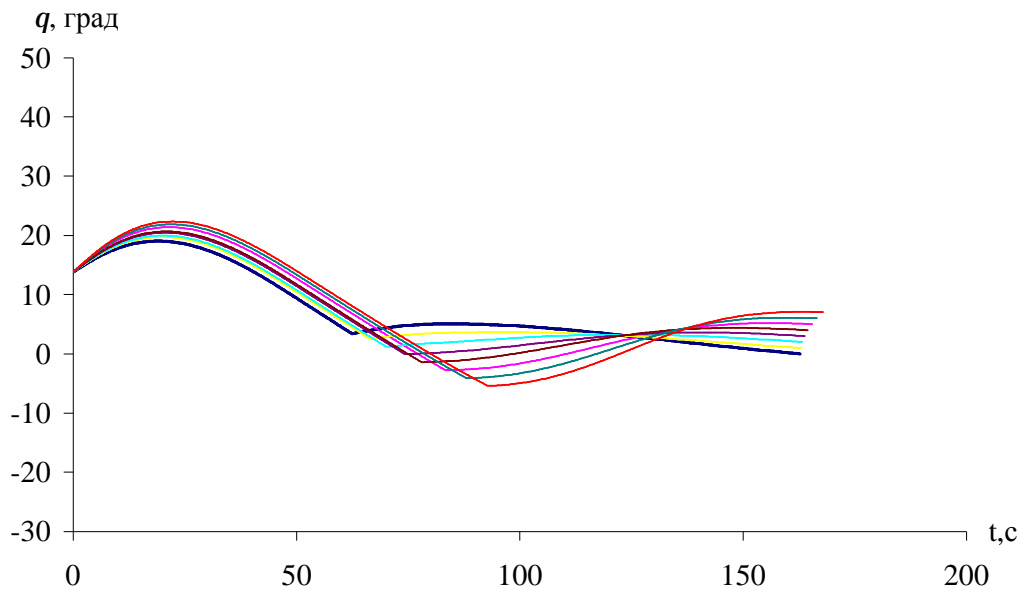


Рис. 8. Зависимость угла наклона траектории от времени

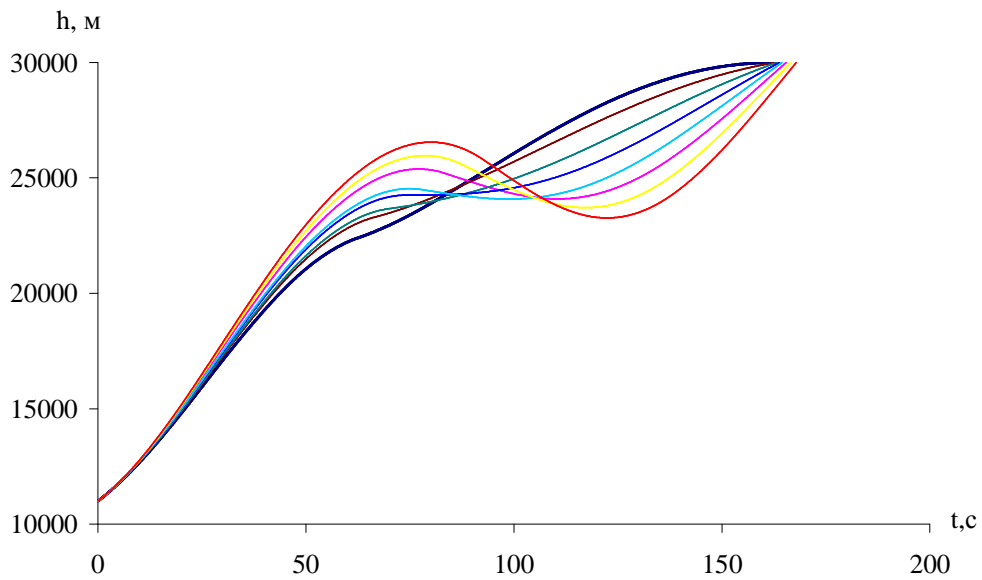


Рис. 9. Зависимость высоты от времени

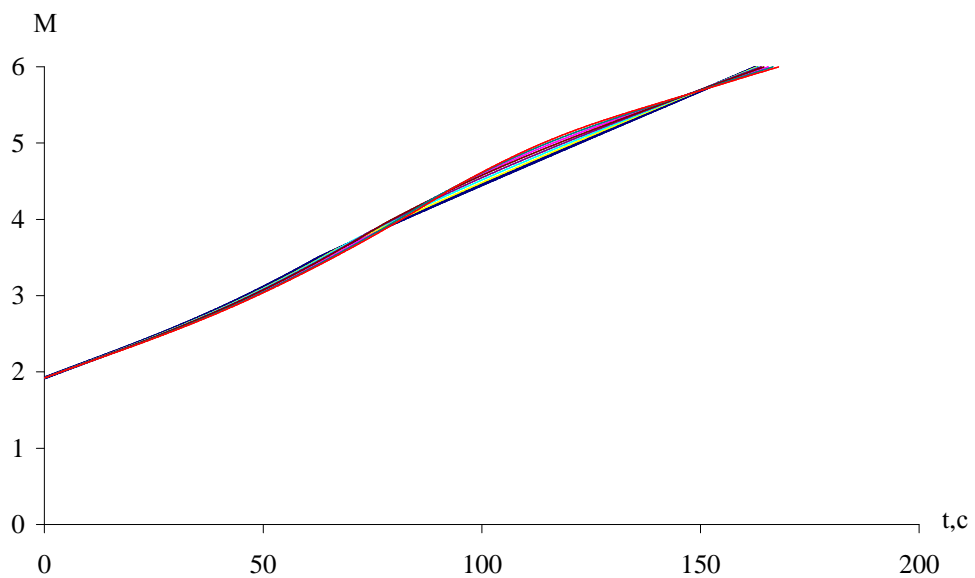


Рис. 10. Зависимость числа M от времени

мической подъёмной силы) позволяют увеличить угол q на первой восходящей части траектории (рис. 8) и, следовательно, достичь большей высоты (рис. 9). Увеличение времени переключения t' позволяет увеличить продолжительность полёта с небольшим углом a_1 (рис. 7) и тем самым обеспечить более «глубокий» рикошет на нисходящей части траектории (рис. 9). Большие значения угла a_2 (большие значения аэродинамической подъёмной силы) позволяют достичь и больших значений q_e в конце второй восходящей части траектории (рис. 8).

Скорость растёт непрерывно и слабо зависит от q_e (рис. 10). Это объясняется следующим. Траектории на первой восходящей части отличаются друг от друга по высоте несущественно (рис. 9). На нисходящей части и второй восходящей части траектории различия как в характере изменения, так и в значениях высоты значительны (рис. 9). Например, для углов q_e от 0° до 3° рикошет вообще отсутствует и происходит непрерывное увеличение высоты. Однако при полёте на более низких высотах (рис. 9, $q_e = 7^\circ$) с большими углами атаки (рис. 7) и, следовательно, с большей силой лобового сопротивления эффект от торможения ГСР компенсируется большими значениями удельного импульса и, соответственно, силы тяги КСУ. И, напротив, при более высоких высотах полёта (рис. 9, $q_e = 0^\circ$) с меньшими углами атаки (рис. 7) и силой лобового сопротивления рост скорости сдерживается уменьшением удельного импульса и, соответственно, силы тяги.

ВЫВОДЫ

По результатам решения задачи оптимизации можно сделать следующие выводы.

1. Для рассмотренного ГСР с начальной тяговооружённостью $m_0 \leq 1$ при заданных граничных условиях движения невозможно получить оптимальный начальный угол наклона траектории для второй (ракетной) ступени АКС.

2. Предложенная приближённо-оптимальная двухступенчатая программа управления углом атаки сохраняет «квазирелейный» характер оптимальной программы и позволяет, избежав трудностей решения краевой задачи формализма принципа максимума, получить траектории движения ГСР, близкие к оптимальным.

3. Поскольку с увеличением конечного угла наклона траектории ГСР растут затраты топлива первой ступени, то для критерия минимума топлива всей АКС требуется совместная оптимизация программ управления первой и второй ступеней. Если определяющим является минимизация топлива ракетной ступени, то требуется обеспечить значение конечного угла наклона траектории ГСР как можно близкое к оптимальному значению для второй ступени. Для этого необходимо увеличивать начальный угол наклона траектории для ГСР и (или) его начальную тяговооружённость ($m_0 > 1$). Это позволит иметь и меньшие начальные углы атаки ГСР и реализовать движение на сверхзвуковом участке с минимальным лобовым сопротивлением (ракетный режим полёта).

Библиографический список

1. Нечаев, Ю. Н. Силовые установки гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов [Текст]/Ю. Н. Нечаев. – М.: Издание Академии Космонавтики им. К.Э. Циолковского, 1996. – 214 с.
2. Нечаев, Ю. Н. Моделирование условий работы пароводородного РТД в составе силовой установки гиперзвукового летательного аппарата [Текст]/Ю. Н. Нечаев, А. С. Полев, А. В. Никулин//Вестник академии космонавтики: направление фундаментальных и прикладных проблем космонавтики, материалы научных докладов на заседаниях направления в 1996-1997 гг. – М., 1998. – С. 159-191.
3. Балакин, В. Л. Оптимизация движения гиперзвукового маршевого самолёта при наборе высоты [Текст]/В. Л. Балакин, А. А. Бебяков//Полёт: Общероссийский научно-технический журнал. – 2007. – № 3. – С. 15-19.

4. Бебяков, А. А. Задача оптимального управления движением гиперзвукового летательного аппарата на этапе разгона-набора высоты [Текст]/А. А. Бебяков//Вестник Самарского государственного аэрокосмического

университета. – 2007. – № 1. – С. 15-21.

5. Остославский, И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов [Текст]/И. В. Остославский, И. В. Стражева. – М.: Машиностроение, 1965. – 463 с.

References

1. Netchayev, Yu. N. Power plants of hypersonic and space aircraft / Yu. N. Netchayev – Moscow: Publishing house of the Cosmonautics Academy named after K. E. Tsiolkovsky, 1996 – 214 pp.

2. Netchayev, Yu. N. Modelling the conditions of operation of a steam hydrogen rocket turbine engine incorporated in the power plant of a hypersonic aircraft/ Yu. N. Netchayev, A. S. Polev, A. V. Nikulin // Vestnik of cosmonautics academy: sector of fundamental and applied problems of cosmonautics, materials of scientific papers presented at the sector's sessions in 1996-1997 – Moscow, 1998. – pp. 159-191.

3. Balakin, V. L. Optimizing the propulsion of a hypersonic aircraft during the climb. / V. L. Balakin, A. A. Bebyakov // Polyot (Flight): All-Russian scientific technical journal. – 2007. – № 3. – pp. 15-19.

4. Bebyakov, A. A. The problem of optimal control over the propulsion of a hypersonic aircraft at the stage of acceleration and climb. / A. A. Bebyakov / Vestnik of Samara State Aerospace University – 2007. – № 1. – pp. 15-21.

5. Ostoslavsky, I. V. Flight dynamics. Aircraft trajectories / I. V. Ostoslavsky, I. V. Strazheva. – Moscow.: Mashinostroyeniye (Machine building), 1965. – 463 pp.

OPTIMIZING THE PROPULSION OF A HYPERSONIC ACCELERATOR AIRCRAFT OF A TWO-STAGE AEROSPACE SYSTEM

© 2008 V. L. Balakin, A. A. Bebyakov, A. G. Kotchyan

Samara State Aerospace University

The paper deals with the propulsion of a hypersonic accelerator aircraft acting as the first stage of a two-stage aerospace system. Optimal and approximately optimal angle of attack programmes are defined on condition that fuel consumption is minimal. The impact of the trajectory inclination finite angle magnitude on the pattern of control programmes and mechanical trajectories is analysed.

Aerospace system, hypersonic accelerator aircraft, angle of attack, control programme, optimization.

Информация об авторах

Балакин Виктор Леонидович, заведующий кафедрой динамики полёта и систем управления, д.т.н., профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: динамика и управление движением летательных аппаратов.

Бебяков Александр Александрович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: динамика и управление движением летательных аппаратов.

Кочян Антонина Грачевна, ассистент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: динамика и управление движением летательных аппаратов.

Balakin, Victor Leonidovitch, head of department of flight dynamics and control systems, professor, doctor of technical science, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. Area of research: dynamics and control of aircraft propulsion.

Bebyakov, Alexander Alexandrovitch, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov. Area of research: dynamics and control of aircraft propulsion.

Kotchyan, Antonina Gratchevna, assistant, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov. Area of research: dynamics and control of aircraft propulsion.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ ГТД

© 2008 С. К. Бочкарёв

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены способы контроля качества измеряемых параметров и отбраковки аномальных измерений при автоматизации серийных ГТД. Они основаны на использовании статистических данных о величине естественного разброса параметров серийных двигателей и закономерностях взаимосвязей отклонений различных параметров в пределах разброса.

Разброс параметров, корреляция, оценка параметра, грубая ошибка измерения.

Большое значение для адекватной интерпретации результатов испытаний газотурбинных двигателей (ГТД) имеет качество исходной информации. В частности, значения измеренных параметров, используемых при анализе результатов испытания, не должны содержать грубых ошибок. С целью поиска и отбраковки параметров, измеренных с грубой ошибкой, при автоматизации испытаний ГТД обычно используются следующие способы контроля качества измерений: многократный опрос измерительных каналов и отбраковка аномальных измерений методами математической статистики; проверка попадания измеренного значения какого-либо параметра в область допустимых значений; сравнительный анализ полученного по ре-

зультатам измерений и априорно заданного радиального поля температур (давлений) газового потока; использование обобщенных закономерностей изменения измеряемых параметров и заданных допусков на возможные отклонения от них. При испытаниях серийных ГТД появляется возможность использования дополнительных, более точных способов контроля качества измерений, основанных на использовании величин и закономерностей разброса параметров.

Дроссельные характеристики серийных двигателей одной серии имеют определённый разброс (рис. 1), который вызван рассеиванием параметров, характеризующих работу узлов двигателя, наблюдающимся из-за того, что изготовление деталей и сборка уз-

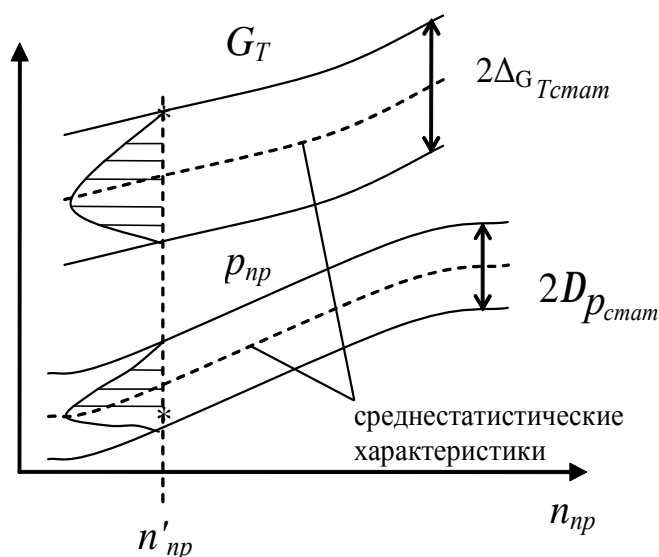


Рис. 1. Поле дроссельных характеристик серийных двигателей:

----- — среднестатистические характеристики;

* — результаты определения параметров у данного двигателя

лов осуществляется с определенными допусками, а также погрешностью измерения параметров при испытании.

Рассеивание характеристик отдельных не отлаженных двигателей подчиняется закону распределения, близкому к нормальному.

При контроле качества экспериментального определения параметров у данного двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения ротора n'_{np} , вначале определяются среднестатистические значения параметров двигателей всей серии на данном режиме:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n},$$

где n – количество дроссельных характеристик, имеющих в статистике.

Вычисляется дисперсия параметров двигателей данной серии на этом режиме:

$$S_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}.$$

Рассчитывается доверительный интервал

$$D_{D_{\tilde{P}}} = tS_P \sqrt{1 + \frac{1}{n}},$$

где $t_{1-\frac{\alpha}{2}, f}$ – квантиль распределения P , соответствующий доверительной вероятности $p=1-\alpha$ и числу степеней свободы $f=n-1$.

Проверяется условие

$$|\bar{D} - D_i| \leq D_{\delta_{\tilde{P}}}$$

Если для какого-либо параметра это условие не выполняется, то он признается определенным с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерений позволяет выявлять грубые ошибки измерений, превышающие 5...6 %.

Величину доверительного интервала, применяемого для поиска грубых ошибок определения параметров, можно уменьшить, если использовать для этих целей закономерности изменений параметров в пределах разброса. Эти закономерности могут быть представлены корреляционными связями между различными параметрами двигателей данной серии на постоянном режиме. Пример двумерных корреляционных связей между значениями тяги P_{np} и расхода топлива $G_{T np}$ на режиме $n'_{np} = \text{const}$ приведён на рис. 2.

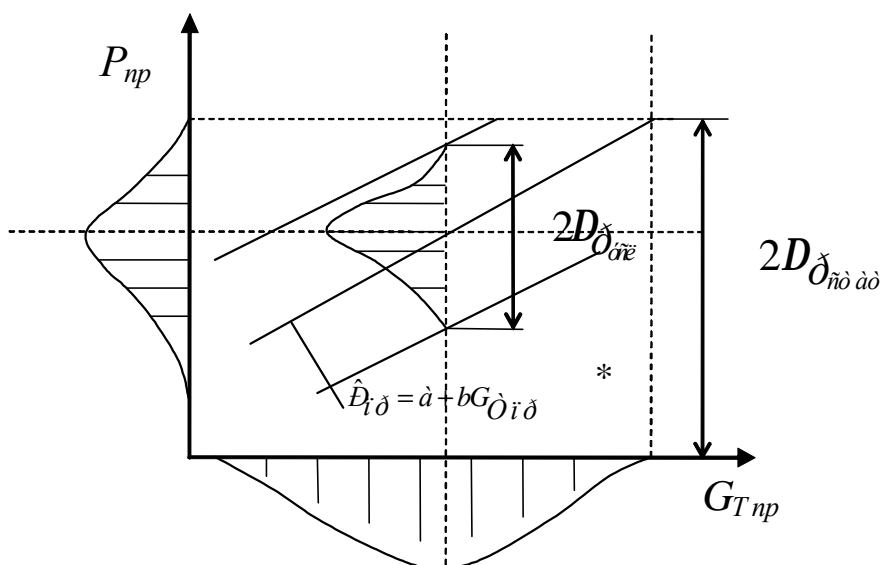


Рис. 2. Корреляционная связь P_{np} с $G_{T np}$ для двигателей данной серии при $n'_{np} = \text{const}$.
* – экспериментальная точка исследуемого двигателя

Зависимость оценки наиболее вероятного значения параметра-функции $\hat{D}_{i\delta}$ от параметра аргумента G_{Tnp} определяется уравнением регрессии

$$\hat{D}_{i\delta} = a + bG_{i\delta},$$

где a и b – коэффициенты уравнения регрессии.

Степень тесноты корреляционной связи оценивается величиной коэффициента парной корреляции r

$$0 \leq |r| \leq 1,$$

а возможное отличие действительных значений параметра-функции P_{np} у данного двигателя от оценки $\hat{D}_{i\delta}$, определённой по уравнению регрессии при известном значении $G_{m,np}$, характеризуется величиной условного доверительного интервала $D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}}$, который может изменяться в диапазоне

$$0 \leq D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}} \leq D_{P_{стат}}.$$

Величины коэффициента корреляции r условного доверительного интервала $D_{P_{усл}}$ связаны между собой соотношением

$$D_{P_{усл}} = D_{P_{стат}} \sqrt{1 - r^2}.$$

Величины коэффициентов корреляции r и регрессии a и b рассчитываются методами математической статистики по имеющимся результатам испытаний двигателей данной серии.

Коэффициенты парной корреляции между различными параметрами газотурбинных двигателей в пределах разброса принимают значения $r = 0,3 \dots 0,9$.

Для контроля качества измерений параметров с использованием закономерностей их разброса осуществляется сравнение подозрительной экспериментальной величины какого-либо параметра (в нашем случае P_{np}) с его оценкой по другому измеряемому параметру (в нашем случае по G_{Tnp}), полученной

с помощью соответствующего уравнения регрессии.

Если при этом не выполняется условие

$$|\hat{D}_{i\delta} - D_{i\delta}| \leq D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}},$$

то параметр признается определённым с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерения позволяет выявить ошибки измерения параметров, которые не могли бы быть найдены предыдущим способом, основанным на проверке попадания вновь полученных экспериментальных точек в поле разброса характеристик двигателя данной серии.

Чувствительность метода можно повысить, если для поиска аномальных измерений использовать не двухмерные, а многомерные корреляционные связи, описываемые уравнениями регрессии вида

$$\hat{P}_{i\delta} = a + b G_{m,np} + c T_{m,np}^* + \dots,$$

которые позволяют получить оценку величин какого-либо параметра по значениям всех остальных измеряемых параметров двигателя. Такой способ контроля требует применения более сложного алгоритма, так как отличие оценки $\hat{P}_{i\delta}$ от экспериментально определённой величины P_{np} , превышающее величину $D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}}$, может быть вызвано грубой ошибкой определения не только параметра-функции, но и какого-либо из параметров-аргументов. Однако он позволяет снизить порог выявленных грубых ошибок измерения до величины 3...4 %.

Все описанные способы контроля качества измерений применяются в реальном масштабе времени, т.е. во время между измерениями параметров на двух соседних экспериментальных точках.

Таким образом, используя закономерности значения параметров серийных двигателей в пределах естественного разброса, можно существенно повысить достоверность экспериментальных данных, используемых для дальнейшей интерпретации результатов испытаний.

PARAMETER MEASUREMENT QUALITY CONTROL IN AUTOMATED TESTING OF SERIES GAS TURBINE ENGINES

© 2008 S. K. Botchkaryov

Samara State Aerospace University

The paper deals with methods of controlling the quality of parameters measured and rejecting anomalous measurements in automated testing of series gas turbine engines. The methods are based on the use of statistical data on the magnitude of natural spread in the parameters of series engines and on the regularity of interrelations of deviations of various parameters within the spread.

Spread in parameters, correlation, parameter evaluation, gross error of measurement.

Информация об авторе

Бочкарёв Сергей Константинович, заместитель проректора по науке и инновациям, к.т.н., доцент, СГАУ. Область научных интересов: теория и испытания двигателей, автоматизация научных исследований, организация научных исследований.

Botchkaryov, Sergei Konstantinovitch, deputy pro-rector on science and innovations, candidate of technical science, associate professor, SSAU. Area of research: theory and testing of engines, automation of scientific research, organization of scientific research.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГТД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

© 2008 С. К. Бочкарёв, А. Я. Дмитриев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрена идентификация линейной математической модели ГТД по результатам испытаний простейшим методом Хубера с учётом дополнительной информации о погрешностях измерения параметров двигателя и возможных величин разброса параметров, характеризующих работу узлов.

Линейная модель, параметры двигателя, параметры узлов, оценки, устойчивые методы, функция цели, дополнительная информация.

В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя P с параметрами его узлов Θ и входными воздействиями X (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(\Theta, X). \quad (1)$$

При заданных внешних условиях (например, при САУ, $V_n = 0$) и заданном режиме работы параметры двигателя определяются только параметрами его узлов, т.е.

$$P = f(\Theta). \quad (2)$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении параметров узлов Θ по значениям параметров двигателя P , определённым в результате испытания.

Так как речь идет о небольшом отклонении искомым параметров, для решения этой задачи целесообразно математическую модель (2) представить в линеаризованном виде:

$$\delta P_j = \sum_{i=1}^n \frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i} \delta \Theta_i + \Delta_j; \quad j = \overline{1, k}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где δP_j – отклонение измеренного значения j -го параметра двигателя от его расчетной величины, %; $\delta \Theta_i$ – отклонение значения i -го

параметра узла от его расчетного значения,

%; $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ – коэффициент влияния i -го параметра узла на j -й параметр двигателя; Δ_j – невязка, обусловленная ошибкой определения значения δP_j из-за ошибок измерений параметров двигателя и погрешностей, вызванных линеаризацией уравнений рабочего процесса; k – количество параметров двигателя, измеряемых при испытании; n – количество параметров узлов, подлежащих идентификации.

Коэффициент влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ показывает, на сколько % изменяется параметр двигателя P_j при изменении на 1 % параметра узла Θ_i . Величины коэффициентов влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ определяются чаще всего виртуальными экспериментами на ЭВМ с помощью нелинейной математической модели ГТД первого уровня.

При известных коэффициентах влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ такая математическая модель представляет собой систему k линейных уравнений с n неизвестными. В этом случае задача идентификации математической модели состоит в оценке поправок $\delta \Theta_i$ к расчетным значениям параметров узлов (КПД узлов, коэффициентов потерь и т.п.) по отклонениям

параметра узла от его расчетного значения, %; $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ – коэффициент влияния i -го параметра узла на j -й параметр двигателя; Δ_j – невязка, обусловленная ошибкой определения значения δP_j из-за ошибок измерений параметров двигателя и погрешностей, вызванных линеаризацией уравнений рабочего процесса; k – количество параметров двигателя, измеряемых при испытании; n – количество параметров узлов, подлежащих идентификации.

При известных коэффициентах влияния $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ такая математическая модель представляет собой систему k линейных уравнений с n неизвестными. В этом случае задача идентификации математической модели состоит в оценке поправок $\delta \Theta_i$ к расчетным значениям параметров узлов (КПД узлов, коэффициентов потерь и т.п.) по отклонениям

параметра узла от его расчетного значения, %; $\frac{\delta P_j}{\delta \Theta_i}$ – коэффициент влияния i -го параметра узла на j -й параметр двигателя; Δ_j – невязка, обусловленная ошибкой определения значения δP_j из-за ошибок измерений параметров двигателя и погрешностей, вызванных линеаризацией уравнений рабочего процесса; k – количество параметров двигателя, измеряемых при испытании; n – количество параметров узлов, подлежащих идентификации.

параметров двигателя δP_j , определённых в результате испытания (тяги, расхода топлива, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях проточной части), от их расчетных значений.

Целесообразность идентификации линеаризованной математической модели двигателя определяется тем, что она позволяет:

- применять методы идентификации, универсальные по отношению к типу и схеме двигателя (так как изменяются лишь количество уравнений и неизвестных, а также численные значения коэффициентов влияния);

- использовать хорошо разработанное для линейных задач современное стандартное математическое и программное обеспечение;

- значительно сократить время решения задачи по сравнению с идентификацией сложной нелинейной модели.

Последнее особенно важно при идентификации математической модели автоматизированными системами испытаний ГТД, решающими задачи в темпе проведения эксперимента.

Особенность идентификации математической модели ГТД, в том числе линеаризованной, заключается в том, что, как отмечалось, количество неизвестных параметров узлов превосходит количество измеряемых параметров двигателя при значительном уровне погрешностей измерения. В связи с этим для получения наиболее достоверного решения задачи важное значение имеет различная дополнительная информация исследователя.

Приведённый ниже метод идентификации математической модели двигателя, позволяющий при решении этой задачи наиболее полно учесть различную дополнительную информацию, заключается в следующем.

Решение системы уравнений (3) осуществляется при условии

$$\sum_{j=1}^k g_j^2 F(D_j) + a \sum_{i=1}^n g_i^2 F(dQ_i - dQ_i^0) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $F(\cdot)$ – функция Хубера; $\delta\Theta_i^0$ – априорная оценка отклонения параметра узла от его расчетного значения;

$g_j = \frac{1}{s_z(dP_j)}$ – коэффициент веса, обратно пропорциональный погрешности измерения параметра двигателя, характеризуемой величиной $\sigma_z(\delta P_j)$;

$g_i = \frac{1}{s(dQ_i)}$ – коэффициент веса, обратно пропорциональный заранее заданной величине возможного разброса параметра узла;

a – коэффициент регуляризации.

Первое слагаемое функции цели (4) учитывает результаты измерений параметров двигателя, второе – априорную информацию о наиболее вероятной оценке параметров узлов данного экземпляра двигателя. Коэффициент регуляризации a позволяет варьировать относительную значимость экспериментальных данных и априорной информации о параметрах узлов. Так, при $a = 0$ априорная информация не учитывается, и получаемые при идентификации математической модели оценки $d\hat{Q}_i$ будут определяться только информацией об измеренных параметрах двигателя. При $a = 1$ оба вида информации учитываются с примерно одинаковой значимостью, а если $a \geq 10$, то при решении задачи данные об измеренных параметрах двигателя в значительной степени игнорируются, и чем больше a , тем ближе оценки $\delta\Theta_i$ к их априорно заданным значениям $\delta\Theta_i^0$.

Алгоритм идентификации математической модели составлен таким образом, что решение задачи осуществляется при некотором оптимальном значении коэффициента регуляризации a_{opt} , при котором невязки Δ_j в уравнении (3) соответствуют погрешностям измерения параметров двигателя и погрешностям, вызванным неточностью используемых коэффициентов влияния.

Физический смысл коэффициентов веса γ_j и γ_i , введенных в функцию цели (4), заключается в следующем: чем больше погрешность измерения какого-либо параметра двигателя $\sigma_z(\delta P_j)$, тем большее значение невязки Δ_j допускается в соответствующем

уравнении математической модели (3); чем больше заранее заданная величина возможного разброса параметра узла $\sigma(\delta\Theta_i)$, тем больше допусковое отличие получаемой при идентификации оценки от ее априорного значения $\delta\Theta_i^0$.

Применение в (4) функции Хубера $F(\cdot)$ позволяет существенно ослабить вредное влияние на значения получаемых оценок $d\hat{Q}_i$ отдельных грубых ошибок измерения параметров двигателя, не выявленных на этапе предварительного анализа результатов испытаний, и неправильных представлений об априорных оценках отдельных параметров узлов $\delta\Theta_i^0$.

По найденным в результате идентификации оценкам $d\hat{Q}_i$ корректируются характе-

ристики узлов, а по нелинейной математической модели двигателя рассчитываются все его параметры.

Приведённый метод идентификации математической модели ГТД основан на совместном использовании разнообразной информации: о величинах данных параметров, о погрешностях измерения параметров, о возможных диапазонах изменения параметров узлов, об их априорных оценках. Применение его в интерактивном режиме позволяет учесть также неформализованный опыт исследователя. Поэтому полученные результаты идентификации, наилучшим образом согласованные с экспериментальными данными, с априорной информацией и с неформализованным опытом исследователя, являются наиболее надёжными.

IDENTIFICATION OF A GAS TURBINE ENGINE MATHEMATICAL MODEL BY THE RESULTS OF TESTING

© 2008 S. K. Botchkaryov, A. Ya. Dmitriyev

Samara State Aerospace University

The paper deals with the identification of a linear mathematical model of gas turbine engines by the results of testing using the simplest Huber method with regard to additional information on engine parameter measurement error and possible magnitudes of parameter variations characterizing unit operation.

Linear model, engine parameters, unit parameters, evaluations, stable methods, purpose function, additional information.

Информация об авторах

Бочкарёв Сергей Константинович, заместитель проректора по науке и инновациям, к.т.н., доцент, СГАУ. Область научных интересов: теория и испытания двигателей, автоматизация научных исследований, организация научных исследований.

Дмитриев Александр Яковлевич, к.т.н., доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, СГАУ. Область научных интересов: автоматизация обработки результатов экспериментальных исследований; идентификация математических моделей.

Botchkaryov, Sergei Konstantinovich, deputy pro-rector on science and innovations, candidate of technical science, associate professor, SSAU. Area of research: theory and testing of engines, automation of scientific research, organization of scientific research.

Dmitriyev, Alexander Yakovlevitch, candidate of technical science, associate professor, department of aircraft construction and quality control in machine building, SSAU. Area of research: automation of processing of experimental research results, identification of mathematical models.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГТД ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

© 2008 С. К. Бочкарёв, В. В. Мосоулин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведены методы выбора наилучших математических моделей дроссельных характеристик двигателя и их применения при определении дроссельных характеристик двигателя по экспериментальным данным. Показано, что наилучший результат при автоматизированном восстановлении характеристик двигателя по малому количеству экспериментальных данных дает робастный метод Хубера с регуляризацией.

Дроссельные характеристики, полиномиальные зависимости, лучшие модели, малое количество экспериментальных точек, устойчивые методы оценивания.

При автоматизации испытаний газотурбинных двигателей (ГТД) после измерения параметров двигателя в последней экспериментальной точке осуществляется так называемое восстановление дроссельных характеристик. Здесь под восстановлением характеристик понимается оценка истинных характеристик двигателя по экспериментальным данным с учетом имеющихся погрешностей измерения параметров и возможных выбросов, не отбракованных на предыдущих этапах обработки результатов измерений.

Для восстановления характеристик двигателя проводится аппроксимация экспериментальных точек некоторыми априорно выбранными функциями. Обычно в качестве этих функций выбираются полиномиальные зависимости вида

$$\hat{D}_{i\delta} = a_0 + a_1 n_{np} + a_2 n_{np}^2 + \dots + a_m n_{np}^m. \quad (1)$$

В классе полиномиальных функций необходимо для каждого параметра выбрать в некотором смысле оптимальную функцию, которая наиболее точно описывает искомую дроссельную характеристику. При этом поиск оптимальных моделей дроссельных характеристик двигателя целесообразно вести не только среди полных многочленов, но и среди всех других, для которых ограничена лишь максимальная степень, а коэффициенты содержатся не при всех степенях режимного параметра. Это позволяет использовать при восстановлении дроссельных характери-

стик двигателя по малому количеству экспериментальных точек (5...8) достаточно сложные модели.

Поскольку количество экспериментальных точек при определении характеристик двигателя мало, а некоторые из них могут содержать не выявленные на этапе контроля грубые ошибки измерения, то выбор лучшей модели целесообразно осуществлять заранее на основе анализа выборок, полученных по расчетным или среднестатистическим характеристикам данного двигателя.

Для выбора лучшей модели целесообразно использовать один из так называемых "внешних" критериев селекции – критерий стабильности. Использование внешних критериев вместо традиционных критериев, базирующихся на распределении Фишера, обосновано тем, что последние требуют знания свойств генеральной совокупности рассматриваемой выборки, которые часто неизвестны, а также тем, что они субъективны, поскольку зависят от заданного уровня значимости.

При применении критерия стабильности имеющаяся выборка делится на две части: обучающую (А), по которой оцениваются коэффициенты модели (1), и контролирующую (В). Для зависимости $P_{np} = f(n_{np})$ критерий стабильности имеет вид

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (P_{i\delta i} - \hat{P}_{i\delta i})_A^2 + \sum_{j=1}^m (P_{i\delta j} - \hat{P}_{i\delta j})_B^2,$$

где P_{npi} и P_{npj} – действительные значения параметра в выбранных точках обучающей и контролирующей выборок; $\hat{P}_{i\delta i}$ и $\hat{P}_{i\delta j}$ – оценки значений параметра в выбранных точках обучающей и контролирующей выборок, определённые по выражению (1); n – количество точек обучающей выборки; m – количество точек контролирующей выборки.

В качестве оптимальной модели выбирается та, для которой значение критерия S^2 минимально. При этом может оказаться, что имеется несколько конкурирующих моделей, для которых значение критерия стабильности примерно одинаково, но число или номенклатура коэффициентов модели различны.

В этом случае в качестве наилучшей модели целесообразно выбрать модель, для которой значение максимальной невязки

$$D = \left| \hat{D}_{i\delta} - \hat{D}_{i\delta} \right|,$$

полученной во всех точках обучающей и контролирующей выборок, минимально и меньше погрешности экспериментального определения параметра P_{np} .

Разбиение выборки на обучающую и контролирующую можно осуществлять следующим образом: в обучающую последовательно включаются точки, соответствующие тем режимам работы двигателя, на которых обычно производится измерение параметров, а в контролирующую последовательность – остальные точки.

В качестве примера ниже приведены лучшие модели для восстановления дроссельных характеристик одного из отечественных ТРДД по 6...8 экспериментальным точкам:

$$\hat{n}_{\hat{A}\hat{i}\hat{\delta}} = a_0 + a_3 n_{\text{НДнр}}^3 + a_5 n_{\text{НДнр}}^5,$$

$$\hat{G}_{\hat{\alpha}\hat{\delta}} = a_0 + a_1 n_{\text{НДнр}} + a_3 n_{\text{НДнр}}^3 + a_4 n_{\text{НДнр}}^4 + a_6 n_{\text{НДнр}}^6,$$

$$\hat{D}_{i\delta} = a_0 + a_1 n_{\text{НДнр}} + a_2 n_{\text{НДнр}}^2 + a_3 n_{\text{НДнр}}^3 + a_4 n_{\text{НДнр}}^4.$$

Максимальные значения невязок D при использовании этих моделей в 3...4 раза

меньше погрешностей измерения параметров.

Определение численных значений коэффициентов a_i в выбранных для каждого параметра моделях осуществляется по результатам испытания двигателя. Обычно для решения подобных задач применяется так называемый метод наименьших квадратов (МНК). Согласно этому методу в качестве оценок коэффициентов a_i принимаются значения \hat{a}_i , при которых удовлетворяется условие

$$\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2 \rightarrow \min,$$

где n – количество экспериментальных точек.

Однако, формальное применение этого метода при восстановлении дроссельных характеристик ГТД по малому количеству экспериментальных точек (5...8) не позволяет получить адекватные результаты, если хотя бы одна из них содержит грубую ошибку измерения.

Поэтому при автоматизированном восстановлении характеристик ГТД по экспериментальным данным в условиях объективно существующей возможности появления грубых ошибок измерений целесообразно использовать так называемые устойчивые (робастные) статистические методы.

Достоинство этих методов заключается в том, что статистические оценки, получаемые с их помощью, мало чувствительны к аномальным экспериментальным данным.

Наиболее подходящим робастным методом для решения поставленной задачи является метод Хубера, который основан на том, что случайные погрешности измерения аппроксимируются случайными величинами, имеющими следующую функцию распределения:

$$F(t) = (1-e)N(t) + eG(t),$$

где $N(t)$ – функция нормального распределения, $G(t)$ – функция симметричного “загрязняющего” распределения, e – малое положительное число.

Такое разложение погрешности измерения соответствует представлению её в виде

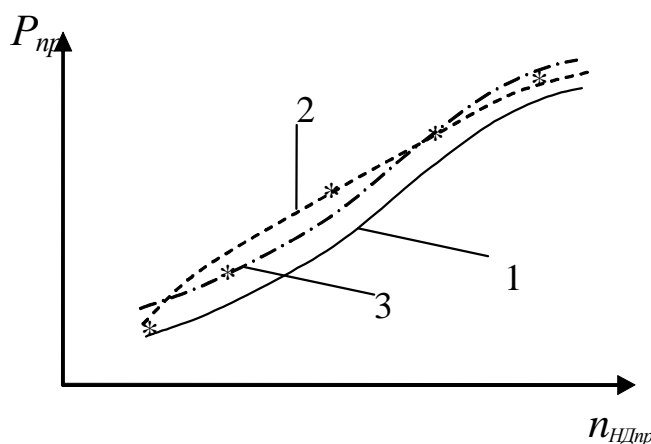


Рис. 1. Восстановление истинной характеристики (1) по экспериментальным точкам (*) методом наименьших квадратов (2), методом Хубера (3) при наличии грубой ошибки в средней экспериментальной точке

суммы нормальной погрешности и некоторого возмущающего воздействия, которое с вероятностью ϵ появляется при измерениях. Предполагается, что возмущающее воздействие можно представить распределенным по закону Лапласа, что все реализации случайной погрешности, которые больше по модулю некоторого заранее выбранного числа q , распределены по этому закону, а все реализации, которые меньше по модулю числа q_1 , – по нормальному закону.

Задача определения коэффициентов a_i в модели (1) решается при условии

$$\sum_{i=1}^n F(P_i - \hat{P}_i) \rightarrow \min,$$

где

$$F(t) \sim \begin{cases} (P_i - \hat{P}_i)^2, & \text{if } |t| \leq q \\ |P_i - \hat{P}_i|, & \text{if } |t| \geq q. \end{cases}$$

Метод Хубера является наиболее предпочтительным для решения задачи восстановления характеристик ГТД по экспериментальным данным, так как принятые при его получении предпосылки наилучшим образом соответствуют ситуации, имеющей место при измерении параметров двигателя, когда наряду с ошибками измерения параметров, имеющих преимущественно закон распределения, близкий к нормальному, могут иногда

появляться грубые ошибки измерения разного знака.

Применение метода Хубера для восстановления дроссельных характеристик ГТД при наличии грубой ошибки измерения даёт существенно более адекватный результат, чем МНК (рис. 1).

Однако и устойчивые методы оценивания не позволяют получить адекватного восстановления экспериментальных характеристик ГТД, если с грубой ошибкой определена крайняя точка дроссельной характеристики (рис. 2).

Для того, чтобы повысить адекватность результатов, необходимо проводить аппроксимацию экспериментальных точек методом Хубера с ориентацией на априорную (известную заранее) модель этой характеристики. В качестве априорной модели характеристики может быть использована расчетная, ранее полученная экспериментальная или среднестатистическая характеристика. Такой метод оценки коэффициентов a_i в (1) называют методом Хубера с регуляризацией. Он реализуется применением функции цели вида

$$\sum_{i=1}^n F(P_i - \hat{P}_i) + a \int_{n_{r\delta \min}}^{n_{r\delta \max}} [\hat{P}^l(n_{r\delta}) - P_{a_i \delta}^l(n_{r\delta})] dn_{r\delta} \rightarrow \min,$$

где $\hat{P}(n_{r\delta})$ – восстановленная по экспериментальным данным дроссельная характеристика

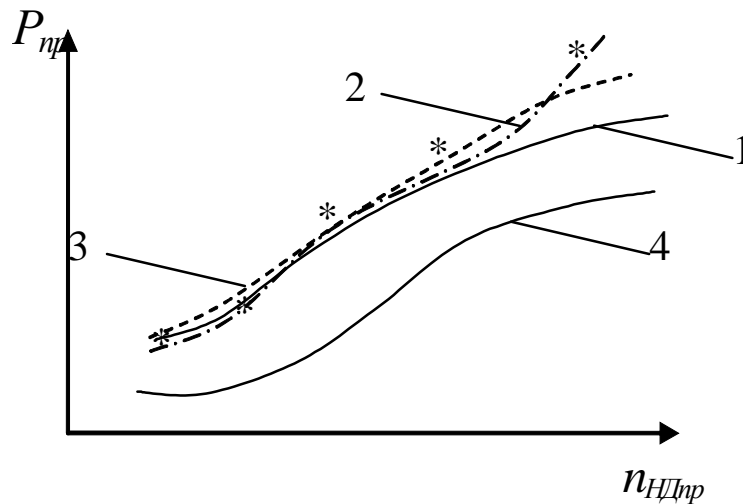


Рис. 2. Восстановление истинной характеристики (1) по экспериментальным точкам (*) методом Хубера (2) и методом Хубера с регуляризацией (3) по априорной характеристике (4) при наличии грубой ошибки в последней экспериментальной точке

ка; $P_{анр}(n_{нр})$ – априорная модель дроссельной характеристики; l – знак производной порядка l ; $n_{нрmin}$, $n_{нрmax}$ – соответственно минимальное и максимальное значения интервала аргумента, на котором осуществляется сравнение восстанавливаемой и априорной характеристик; a – коэффициент регуляризации.

Выбор первого порядка производной $l=1$ означает, что при восстановлении характеристики по экспериментальным данным накладывается дополнительное требование об эквидистантности восстанавливаемой и априорной характеристики; выбор второго порядка производной $l=2$ означает, что при восстановлении характеристики допускается ее линейное расхождение с априорной характеристикой.

Величина коэффициента регуляризации a определяет степень влияния используемой априорной характеристики на получаемый результат. Если $a=0$, то априорная информация о характеристике игнорируется, и восстановление характеристики осуществляется только на основе полученных экспериментальных данных. При больших значениях a

экспериментальные данные практически игнорируются, и получаемая характеристика по своим свойствам совпадает с априорной.

Оптимальную величину коэффициента регуляризации a выбирают исходя из того, чтобы полученная после решения задачи средневзвешенная дисперсия остаточных невязок между экспериментальными и восстановленными по модели (1) значениями параметров соответствовала погрешности измерения этого параметра.

Применение метода Хубера с регуляризацией позволяет получить существенно более адекватные результаты при восстановлении характеристик двигателя в случае наличия грубой ошибки в любой экспериментальной точке, в том числе и крайней (рис. 2).

Применение этого метода эффективно также при экстраполяции экспериментальных характеристик двигателя.

Однако следует отметить, что метод позволяет получать достаточно надёжные результаты при наличии грубых ошибок измерения не более чем в 20-30 % экспериментальных точек.

AUTOMATED RESTORATION OF GAS TURBINE ENGINE CHARACTERISTICS BY EXPERIMENTAL DATA

© 2008 S. K. Botchkaryov, V. V. Mosoulin

Samara State Aerospace University

The paper presents methods of selecting the best mathematical models of engine throttle characteristics and using these when defining engine throttle characteristics by experimental data. Huber robust regularization method is shown to yield the best result under engine characteristics automated restoration with the smallest amount of experimental data.

Throttle characteristics, polynomial dependences, best models, small number of experimental points, stable methods of evaluating.

Информация об авторах

Бочкарёв Сергей Константинович, заместитель проректора по науке и инновациям, кандидат технических наук, доцент, СГАУ. Область научных интересов: теория и испытания двигателей, автоматизация научных исследований, организация научных исследований.

Мосоулин Владимир Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЦ космической энергетики, СГАУ. Область научных интересов: испытания двигателей, статистическая обработка экспериментальных данных.

Botchkaryov, Sergei Konstantinovitch, deputy pro-rector on science and innovations, candidate of technical science, associate professor, SSAU. Area of research: theory and testing of engines, automation of scientific research, organization of scientific research.

Mosoulin, Vladimir Viktorovitch, candidate of technical science, science research center of space energetics. Area of research: testing of engines, statistical processing of experimental data.

ПРИБЛИЖЁННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ МАЛОЙ ТЯГИ. ЧАСТЬ II

© 2008 В. В. Салмин, В. В. Васильев, С. А. Ишков, В. А. Романенко,
В. О. Соколов, О. Л. Старина, В. В. Юрин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Во второй части статьи приведены результаты решения ряда прикладных задач перелётов космических аппаратов с двигателями малой тяги.

Космический аппарат, малая тяга, оптимальное управление, приближённые методы, геоцентрические манёвры, относительное движение, межпланетные перелёты

2. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕЛЁТОВ С МАЛОЙ ТЯГОЙ

2.1. Задача оптимизации управления траекторным и угловым движением КА с учётом ограничений на угловую скорость поворота вектора тяги

Записывается система уравнений плоского движения космического аппарата (КА) с постоянной по величине малой тягой (МТ) в центральном поле

$$\begin{aligned} \dot{r} &= V \sin q; \quad \dot{V} = \frac{\sin q}{r^2} + \frac{a_0 d}{1 - a_0 t / c} \cos(J - q); \\ \dot{q} &= \frac{\cos q}{V} \left(\frac{V^2}{r} - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{a_0 d}{1 - a_0 t / c} \sin(J - q); \\ \dot{J} &= \Omega + \frac{V \cos q}{r}; \quad \dot{\Omega} = \frac{V \cos q}{r}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Вектор состояния x в рассматриваемой задаче включает в себя безразмерные компоненты (r, V, q, J, u) , а вектор управления u - компоненты (d, Ω) , причём

$$d = \{-1, 0, +1\}, \quad -\Omega_{max} \leq \Omega \leq \Omega_{max}.$$

В качестве критерия оптимальности примем время перелёта: $T = (t_K - t_0) \rightarrow \min$.

Используя формализм принципа максимума Понтрягина, получим оптимальное управле-

ние: $\Omega_{opt}(t) = \Omega_{max} \cdot \text{sign} y_J$, где y_J - сопряжённая переменная. Если $y_J \equiv 0$, то структура управления содержит особый режим:

$$\tilde{\Omega}(t) = - \frac{\{H_0, \{H_0, y_J\}\}}{\{y_J, \{H_0, y_J\}\}} \equiv \frac{V}{r} \cdot \frac{y_q \sin J - r y_r \cos J}{(y_q^2 + V^2 y_v^2)^{3/2}}. \quad (2.2)$$

В данном случае особый режим имеет простой смысл. Это решение первого порядка для той же задачи, но без учёта одной дифференциальной связи, т.е. на некотором расширенном множестве $E \supset D$. Если оно оптимально на E , то оно оптимально и на D . Следовательно, особый режим должен быть включён в состав искомого решения, структуру которого естественно представлять из трёх участков: 1) движение из начальной точки в фазовом пространстве до особой поверхности; 2) особый режим; 3) сход с особой поверхности и достижение конечной точки. Система (2.1) допускает решение такой структуры, которое окончательно находится в ходе решения краевой задачи. Таким образом, особые экстремали в задаче управления с ограничением на угловую скорость поворота вектора тяги совпадают с экстремалими традиционной задачи оптимизации, когда движение КА вокруг центра масс (ЦМ) не учитывается и ограничения на угловую скорость поворота вектора тяги отсутствуют. Этот результат вытекает из анализа задачи управле-

ния в общей постановке, где вывод об особых участках был сделан на основании замены исходного множества D на более широкое E (иными словами, исключая уравнения углового движения).

Необходимое условие оптимальности особого режима заключается в неотрицательности скобки Пуассона

$$\{Y_J, H_*\} = \frac{a_0 |\cos(\tilde{J} - \tilde{q})| (\tilde{y}_q^2 + \tilde{y}_v^2 V^2)}{(1 - a_0 t / c) \tilde{V}^2 \tilde{y}_v} \geq 0.$$

Последнее условие выполняется, если всюду на особом участке траектории переменная \tilde{y}_v неотрицательна.

На рис. 2.1 показаны характер изменения угловой скорости Ω и угла α между вектором тяги и касательной к траектории. Естественно, что разгон КА с ограничением на скорость поворота вектора тяги занимает большее время, чем без ограничения. Время достижения параболической скорости на «экстремальной» траектории, т.е. без ограничений на Ω , может служить оценкой нижней границы функционала T .

2.2. Задача оптимизации траекторий перелёта с непрерывной тягой между круговыми некомпланарными орбитами

При оптимизации траекторий перелётов между некомпланарными орбитами решающее значение приобретают затраты рабочего тела на разворот корпуса КА. Усред-

нённые уравнения околокругового движения КА с МТ имеют вид:

$$\frac{d\hat{r}}{du} = \frac{a_0}{2p} \int_0^{2p} r^3 \cdot \cos y \cdot \exp\left(\frac{V_X}{c}\right) du,$$

$$\frac{d\hat{i}}{du} = \frac{a_0}{2p} \int_0^{2p} r^2 \cdot \sin|y| \cdot \cos|u| \cdot \exp\left(\frac{V_X}{c}\right) du, \quad (2.3)$$

$$\frac{d\hat{r}}{du} = \frac{a_0}{2p} \int_0^{2p} r^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{W}{c}\right) du = a_0 \hat{r}^{3/2} \exp\left(\frac{V_X}{c}\right),$$

$$\frac{dt}{du} = \left(\hat{r}\right)^{3/2}.$$

Угловое движение КА осуществляется только вокруг нормальной оси аппарата OY_1 , совпадающей с направлением радиуса-вектора ЦМ:

$$\frac{dy}{du} = w_{Y_1} r^{3/2}; \quad \frac{dw_{Y_1}}{du} = \frac{M_{Y_1}}{I_{Y_1}} r^{3/2} = e \cdot r^{3/2}. \quad (2.4)$$

В качестве критерия оптимальности использована характеристическая скорость V_{XK} и найдена локально-оптимальная программа управления в пределах витка $\bar{y}(u)$:

$$\bar{y}(u) = \arctg(\operatorname{tg} y_{\max} \cos u),$$

$$\operatorname{tg} y_{\max} = -I \ln r_K \cdot (1 + 2I(i_K - i_0))^{-1}. \quad (2.5)$$

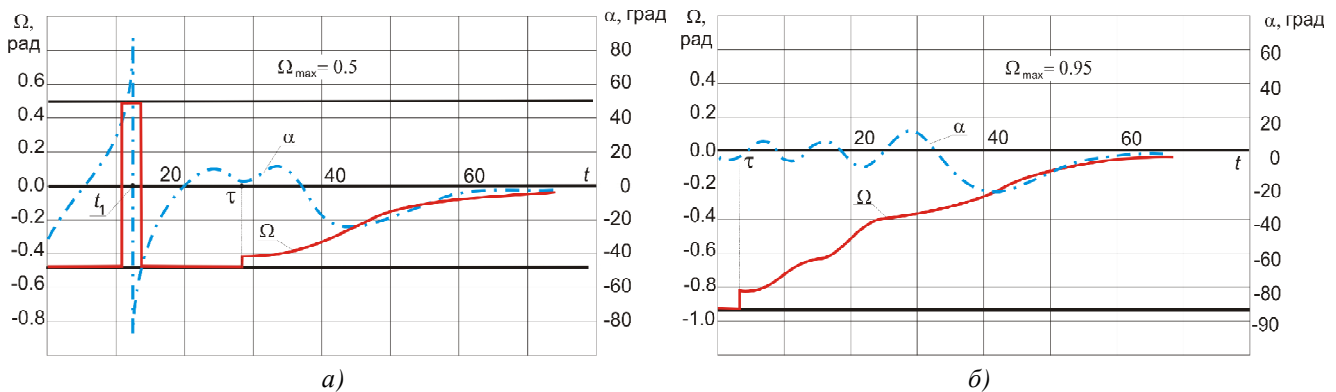


Рис. 2.1. Характер изменения угловой скорости поворота вектора тяги Ω и угла α на оптимальной траектории ($a_0 = 10^{-2}$; $c = 5.2$), t_1 - момент реверса тяги, t - момент перехода на особый режим;

а) $\Omega_{\max} = 0,5$; б) $\Omega_{\max} = 0,95$

Проведена оптимизация медленно меняющейся составляющей управления с использованием достаточных условий оптимальности и построена синтезирующая функция

$$j(r, i) = -\min_D V_{XK} = -\left(1 - \frac{2 \cos(p(i_k - i)/2)}{\sqrt{r_k/r}} + \frac{r}{r_k}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Используя её, можно оценить степень близости решения к абсолютно оптимальному.

Результаты расчёта оптимальной траектории перелёта КА на геостационарную орбиту приведены на рис. 2.2. Рассматривая задачу совместной оптимизации траекторного и углового движений, считаем, что двигатели жёстко закреплены относительно корпуса, а разворот КА происходит только вокруг связанной оси OY_1 . Получены необходимые условия реализации программ ориентации вектора тяги с помощью управляющего момента M_{Y_1} :

$$e_{\max} = \left(\frac{M_{Y_1}}{I_{Y_1}}\right)_{\max} \geq \max_i \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.7)$$

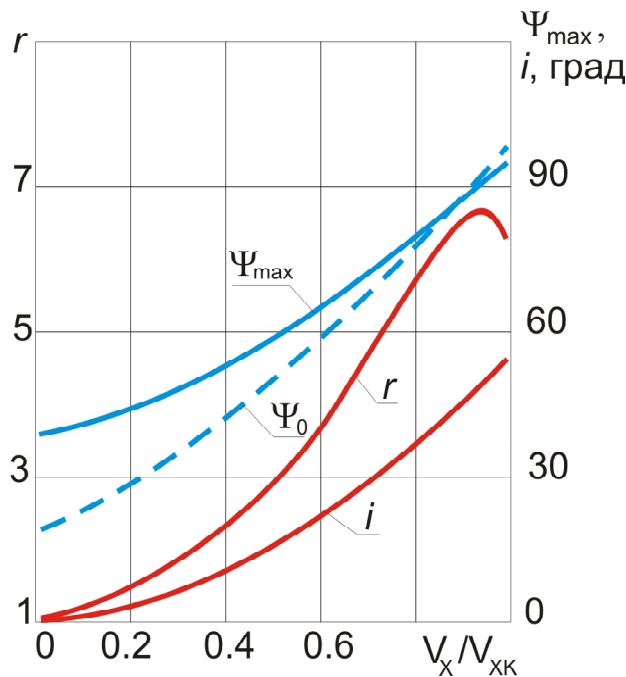


Рис. 2.2. Параметры оптимальной траектории перелёта на стационарную орбиту: $r_k = 6,23$

С учётом ограничений на управляющий момент выбрана приближённо-оптимальная структура управления угловым движением и получена новая «асимптотическая» модель пространственного движения

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dV'_k} &= \frac{4r^{3/2}}{p(1+2ka/p)} \left[\left(\frac{p}{2} - a\right) \cdot \cos y_{\max} + a \cdot I_1 \right]; \\ \frac{di}{dV'_k} &= \frac{2r^{1/2}}{p(1+2ka/p)} [\cos a \cdot \sin y_{\max} + a \cdot I_2], \end{aligned} \quad (2.8)$$

где усредняющие интегралы имеют вид

$$\begin{aligned} I_1^0 &= \int_0^1 \cos y_{\max} (1-z^2) dz; \\ I_2^0 &= \int_0^1 \sin y_{\max} (1-z^2) \cdot \sin a \cdot (1-z) dz; \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\hat{e} = |e| \cdot \frac{I_{Y_1}}{a_0 h}$$

Результаты расчётов перелётов на геостационарную орбиту, выполненные для совместной ($\kappa = 0$) и отдельной ($\kappa = 0,1$) схем управления, показывают, что характеристическая скорость перелёта зависит от уровня располагаемого углового ускорения, и поэтому e_{\max} должно выбираться путём параметрической оптимизации.

2.3. Оптимизация траекторий и проектных параметров МТА с двигателями МТ

Межорбитальные транспортные аппараты (МТА) предназначены для доставки полезных грузов на достаточно удалённые рабочие орбиты с низких орбит выведения. Особый интерес представляют МТА с ЭРД в плане их использования для размещения на высоких орбитах крупногабаритных конструкций, таких, как солнечные электростанции, антенны радаров, элементы радиотелескопов. Все эти конструкции обладают малой жёсткостью и имеют существенные ограничения на транспортную перегрузку.

При выборе опорных траекторий и последующем формировании алгоритмов управ-

ления будем использовать достаточно близкие к оптимальным программные управления и траектории. Выберем такие структуры управления, которые заведомо допускают возможность их практической реализации.

Запишем уравнения, описывающие эволюцию параметров орбиты «в среднем»:

$$\frac{dr}{dV_x} = \frac{2r^{3/2}}{F} J_1, \quad \frac{di}{dV_x} = \frac{r^{1/2}}{F} J_2. \quad (2.10)$$

Усредняющие интегралы J_1, J_2 характеризуют «в среднем» управление ориентацией вектора тяги, интеграл F характеризует дополнительные затраты на управление вращательным движением в пределах витка

$$J_1 = \int_0^{2p} \cos y \, dj, \quad J_2 = \int_0^{2p} \sin |y| |\cos j| \, dj, \\ F = \int_0^{2p} (1 + |d_{\dot{i}D}| c) \, dj. \quad (2.11)$$

Время работы управляющих двигателей вычисляется по формуле

$$t_{\dot{i}D} = \frac{1}{p \cdot a_0} \int_0^{V_{xK}} \frac{2a}{1 + c \frac{2a}{p}} \exp\left(-\frac{V_x}{c}\right) dV_x. \quad (2.12)$$

Управлением в данной задаче служит параметр y_m – амплитуда колебаний угла ориентации тяги. С использованием формализма принципа максимума Понтрягина можно получить оптимальную программу управления.

Проведённые для «совместной» схемы управления ($c = 0$) расчёты показали, что при малых значениях располагаемого углового ускорения $e_{\dot{i}D}$ на начальном участке траектории перелёта угол y_m выходит на предельный уровень $y_m = y_{\dot{i}D}$ (при этом $a \equiv p/2$) и сохраняет его до достижения такого радиуса, при котором возможен переход на «регулярный» режим.

При **раздельной** схеме управления ($c \neq 0$) на первом участке реализуется транс-

версальная ориентация тяги, движение происходит без поворота плоскости орбиты, угол y поддерживается равным нулю. На втором участке амплитуда колебаний угла y резко увеличивается, чтобы компенсировать недостаточную эффективность управления на первом участке. С увеличением χ растёт протяжённость участка движения КА без разворотов с $y \equiv 0$. Зависимость V_{xK} от e для раздельной схемы управления показана на рис. 2.3.

На начальном этапе выбор оптимальных параметров, задающих базовый проектный облик МТА, ведётся по расчётному значению характеристической скорости V_{xK}^o . Одновременно оцениваются диапазон изменения параметров и критерия оптимальности m с учётом верхней границы $V_{xK}^o = V_{xKB}$. Далее процесс оптимизации ведётся итеративно.

Результаты оптимизации проектно-баллистических характеристик и параметров МТА в ходе реализации итеративной процедуры приведены в табл. 2.1.

Корректная постановка динамической задачи оптимизации позволила уточнить энергетику перелёта и показала принципиальную возможность улучшения массовой отдачи программ космической транспортировки. Начальная масса МТА $M_0 = m^{-1} M_{IA}$, определённая согласно приближённым оценкам энергетики перелёта, оказалась завышенной. Оптимизация показала также возможность уменьшения потребной мощности энергоустановки и тяги блока маршевых ЭРД.

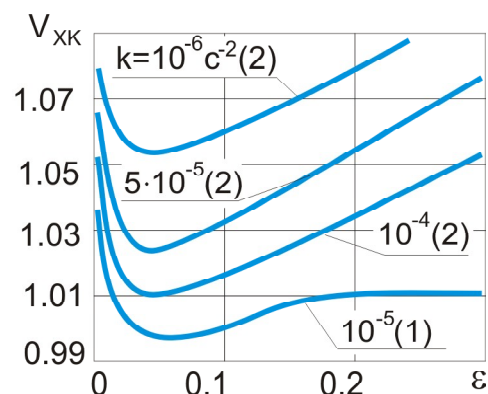


Рис. 2.3. Результаты решения при раздельной схеме управления

Таблица 2.1. Результаты оптимизации проектно-баллистических характеристик МТА
 $r_0 = 6870$ км, $r_K = 42164$ км, $i_0 = 51^\circ$, $i_K = 0^\circ$, $a_{\dot{\gamma}0} = 20$ кг/кВт, $g_{\dot{\alpha}0} = 60$ кг/Н, $g_{\dot{\delta}0} = 0,07$

Итерация	Оптимальные параметры перелёта и МТА						
	T_1 , сут	T_2 , сут	$V_{\text{ХК1}}$, км/с	m	c , км/с	$\epsilon_m \cdot 10^6 \text{ с}^{-2}$	C
Оценка энергетики перелёта с учётом 10% запаса на управление	152,2	47,8	8,406	0,445	30,4	-	0,05
1. Энергетика перелёта оптимизируется (первая строка - совместная схема, вторая - раздельная)	158,4	41,64	7,580	0,528	32,4	0,325	-
	157,0	43,0	7,693	0,511	31,7	0,260	0,026
2. Совместная оптимизация параметров МТА и траекторий перелёта	157,3	42,7	7,713	0,514	31,9	0,135	0,014
3. Учет дополнительных затрат на реализацию траектории	155,8	44,2	7,819	0,499	31,1	0,180	0,018

2.4. Задача оптимизации траекторий перелёта на геостационарную орбиту КА с ЭРД с солнечным источником энергии

Запишем уравнения околокругового орбитального движения:

$$\frac{dr}{du} = 2r^3 a \cos y; \quad \frac{di}{du} = ar^2 |\cos u| |\sin y|;$$

$$\frac{dt}{du} = r^{3/2}; \quad \frac{dW}{du} = ar^{3/2}. \quad (2.13)$$

Примем, что реактивное ускорение a изменяется в зависимости от косинуса угла между направлением на Солнце и нормалью к плоскости солнечных батарей: $a = a_0 \cos b$.

Рассмотрим теперь задачу на минимум времени перелёта. Приведём систему (2.13) к аргументу t (уравнение для характеристической скорости не учитывается):

$$\frac{dr}{dt} = 2a_0 r^{3/2} \cos b \cos y,$$

$$\frac{di}{dt} = a_0 r^{1/2} \cos b |\cos u| |\sin y|. \quad (2.14)$$

Пусть реализуется вариант управления ориентацией солнечных батарей (СБ), когда ось OZ_{CB} постоянно совпадает с осью OZ_r . В этом случае $\cos b_{\text{imax}}$ определяется выражением (1.50) [1]. Если d - угол между направлением на Солнце и нормалью к плоскости орбиты OZ , то из (1.50) можно получить

$$\cos b_{\text{imax}} = \sqrt{1 - (\cos y \cos d - \sin y \sin d \cos(u + u_0))}. \quad (2.15)$$

Здесь d - функция оскулирующих элементов орбиты, определяемая из выражения

$$\cos d = \cos i \sin e_0 \sin q - \sin i \cos e_0 \cos \Omega \sin q + \sin i \sin \Omega \cos q, \quad (2.16)$$

где e_0 - угол наклона плоскости эклиптики к плоскости экватора; q - угол между направлением на точку весеннего равноденствия и линией Земля - Солнце. При расчёте d необходимо учитывать движение Солнца по эклиптике (изменение q) и прецессию восходящего узла орбиты Ω .

Сформулируем задачу о минимуме конечного значения аргумента t системы уравнений (2.14) с учётом связи в форме (2.15). Управлениями в данной задаче служат углы y и b . После преобразований получаем следующие решения:

$$\cos \tilde{b} = \left| -y_r r^{3/2} \cos y - \frac{y_i}{2} r^{1/2} \cos u \sin y \right| a_0,$$

$$\text{tg}|\tilde{y}| = \frac{y_r y_i a_0^2 r^2 \cos u + 2 \sin d \cos d \cos(u + u_0)}{y_r^2 a_0^2 r^3 - \frac{y_i^2}{4} a_0^2 r \cos^2 u - \sin^2 d \cos^2(u + u_0) \cos^2 d}. \quad (2.17)$$

Они содержат две произвольные постоянные: y_r и y_i , которые рассматриваются как

медленно меняющиеся переменные. Начальное приближение для них задавалось решением задачи оптимизации без ограничений. Вдоль траектории фиксировались характерные значения этих переменных, рассчитывались текущие значения угла d , а затем по формулам (2.17) рассчитывались \tilde{b} и \tilde{y} .

Результаты расчёта показаны на рис. 2.4. Параметры расчёта подобраны так, что они соответствуют переходу с низкой круговой орбиты с наклоном 51° на стационарную орбиту. На начальном участке траектории перелёта $\cos b$ мал, поэтому уровень реактивного ускорения недостаточен и процесс разгона КА затягивается. В средней части траектории значение $\cos b$ увеличивается, профиль угла ориентации тяги $y(u)$ становится близким к оптимальному в задаче без ограничений. На заключительном этапе КА движется в плоскости, близкой к плоскости экватора, и поэтому удаётся достигнуть близких к единице значений $\cos b$. С физической точки зрения полученные решения соответствуют компромиссу между достижением максимальной электрической мощности СБ и оптимальной программой разворотов вектора тяги КА в плоскости орбиты.

В зависимости от даты старта, которая определяет начальную ориентацию плоско-

сти орбиты относительно Солнца, траектория межорбитального перелёта КА с солнечным ЭРД будет характеризоваться различным временем затенения. Поставим задачу отыскания таких дат старта, при которых суммарное время t пребывания КА в тени минимально.

Серия расчетов перелётов в окрестность геостационарной орбиты, выполненных для различных значений параметров Ω_0 , T_{CT} , позволяет построить линии равных времён пребывания КА в тени и выбрать оптимальные дату старта и положение восходящего узла орбиты. Например, диаграмма (рис. 2.5), построенная для $a^* = 10^{-3}$ м/с² и $c^* = 60$ км/с, показывает, что при одинаковом моторном времени перелёта $T^* = 86,4$ сут время пребывания в тени составляет от 0,7 до 18,6 сут. Оптимальные и неоптимальные даты старта повторяются с периодичностью 6 месяцев. При фиксированной дате старта можно добиться уменьшения времени пребывания КА в тени за счёт оптимального выбора начальной ориентации плоскости орбиты (угла Ω_0). Описанная приближённая методика позволяет существенно сузить границы области поиска оптимальных дат старта для КА с ЭРД с солнечной энергоустановкой.

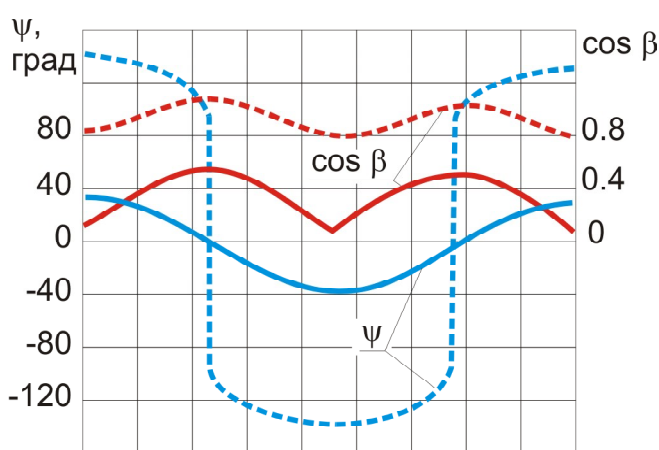


Рис. 2.4. Характер изменения параметров y и $\cos b$ на траектории перелёта на геостационарную орбиту при одноканальном управлении СБ ($a_0 = 10^{-3}$ м/с²; $c = 60$ км/с);
 - - - - начальный участок: $r = 6700$ км; $i = 51^\circ$;
 ————— конечный участок: $r = 43\,000$ км; $i = 1,5^\circ$

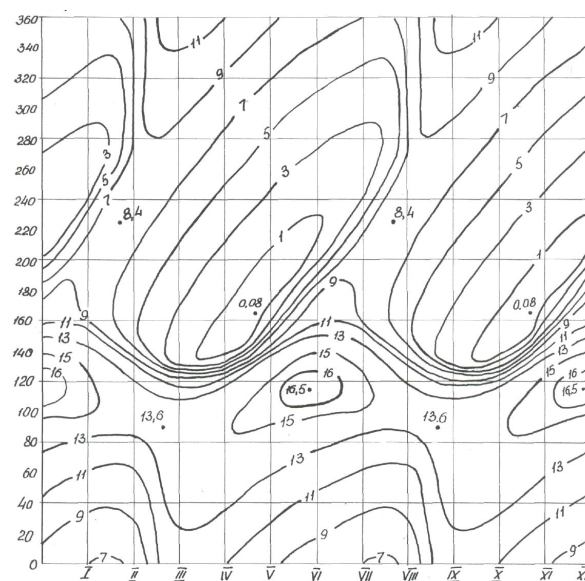


Рис. 2.5. Изолинии продолжительности теневого участка для перелётов КА с солнечным ЭРД на геостационарную орбиту

2.5. Синтез приближённо-оптимальных алгоритмов наведения

Условием решения задачи терминального управления является перекрытие области достижимости X'_K , образующейся в конце этапа дальнего наведения в результате влияния неучтённых факторов, возмущений и ошибок реализации программы, областью гарантированного приведения $\Gamma(\Delta V_j)$, соответствующей определённому уровню затрат на участке точного наведения ($\Delta V_j = fixe$).

Наиболее простой способ ликвидации накопившихся ошибок по радиусу и наклону орбиты заключается в периодическом пересчёте программы управления, сохраняющей базовую структуру. Обновление модулирующей функции $y_m(V)$ производится по следующей схеме:

$$y_{mj} = \arctg \left\{ \frac{\sin p \left(\hat{i}_j - i_K \right)}{2} \sqrt{\frac{\hat{r}_j}{r_K}} \left[1 - \cos \frac{p \left(\hat{i}_j - i_K \right)}{2} \sqrt{\frac{\hat{r}_j}{r_K}} - \left(V - \hat{V}_j \right) \sqrt{1 - 2 \cos \frac{p \left(\hat{i}_j - i_K \right)}{2} \sqrt{\frac{\hat{r}_j}{r_K} + \frac{\hat{r}_j}{r_K}} \right]^{-1} \right\}. \quad (2.18)$$

Для решения задачи фазирования введём новый контролируемый параметр, которым будем характеризовать положение КА относительно заданной точки конечной орбиты – «условную» долготу $I_{\hat{n}}$, совпадающую с геоцентрической долготой КА при нулевом наклоне плоскости орбиты:

$$I_{\hat{n}} = \Omega + u - S_0 - w_C(t - t_{SO}).$$

На момент t_K величина $I_{\hat{n}}$ определяется согласно выражению

$$I_C(t_K) = I_C(t_{SO}) - w_C(t_K - t_{SO}) + \int_{t_{SO}}^{t_K} \left(\frac{du}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} \right) dt, \quad (2.19)$$

которое используется для формирования невязки в процедуре решения краевой задачи.

Рассмотрим алгоритм совместного управления траекторным и угловым движением КА, настраивающийся на ликвидацию конечного промаха по компонентам вектора состояния. Базовая программа изменения модулирующей функции $y_m(V_x)$ определяется на каждом шаге управления в результате решения краевой задачи (рис. 2.6).

На участке быстрой переориентации КА управляющее угловое ускорение меняется по закону $e_{\dot{\alpha}} = -e_m \text{sign} K(j, j\&)$, где $K = j + \frac{j\&}{2e_m}$ - функция переключения; $j, j\&$ - рассогласования по углу и по угловой скорости в канале рыскания. В силу «асимметрии» программы управления $j(u)$ «левые» и «правые» развороты КА выполняются на разные углы:

$$\begin{aligned} j &= \Delta y(t) = y_{iD}(t) - y_{\dot{E}}(t), \\ j\& &= \Delta y\&(t) = y\&_{iD}(t) - y\&_{\dot{E}}(t). \end{aligned} \quad (2.20)$$

На участке поворота КА с «остаточной» угловой скоростью:

$$y_{\dot{E},iD} = y_{\dot{E},iD}(t_i) + y\&_{\dot{E},iD}(t_i) \cdot (t - t_i).$$

Вследствие движения центра масс КА по орбите начало орбитальной системы координат OXYZ совершает вращение вокруг центра притяжения с угловой скоростью w_0 . При

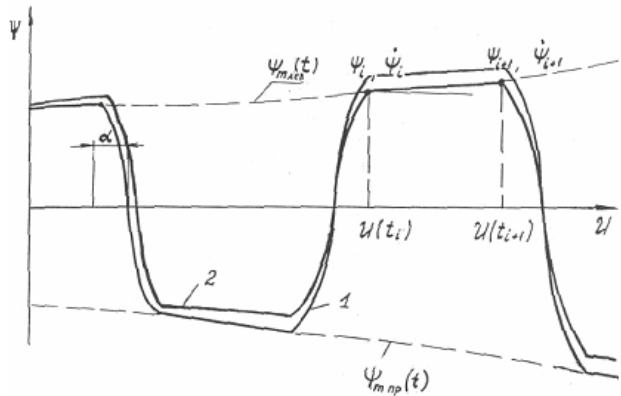


Рис. 2.6. Формирование управления ориентацией вектора тяги в алгоритме пространственного наведения: 1 - номинальная программа управления; 2 - фактическая реализация

этом возникают компоненты угловой скорости по осям связанной системы координат $OX_1Y_1Z_1$ - w_{x1} , w_{y1} , w_{z1} :

$$w_{x1} = w_0 \sin y, \quad w_{y1} = \frac{dy}{dt},$$

$$w_{z1} = -w_0 \cos y, \quad w_0 = \frac{V \cos q}{r}. \quad (2.21)$$

С учётом этих соотношений получены выражения для управляющих моментов по связанным осям и программных управляющих ускорений по всем трём осям:

$$e_{x1} = \frac{M_{x1}}{I_{x1}} = w_0 \frac{dy}{dt} \cos y,$$

$$e_{y1} = \frac{M_{y1}}{I_{y1}} = \frac{d^2 y}{dt^2} + w_0^2 \sin y \cos y,$$

$$e_{z1} = \frac{M_{z1}}{I_{z1}} = 2w_0 \frac{dy}{dt} \sin y. \quad (2.22)$$

Программа управления может быть описана выражениями

$$y(u, t) = -y_{mi}(t) \text{sign}(\cos(u + g_i)) \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{z}{a^2} \left[\left(\bar{u} - \frac{p}{2} \right) \text{sign} \sin(2u + a) \right]^2 \right\}, \quad (2.23)$$

$$e_{y1} = \frac{1}{2} e_m \text{sign}(\cos(u + g_i)) \times$$

$$\times \left[1 + \text{sign} \left(\sin^2 u - \sin^2 \left(\frac{p}{2} - a \right) \right) \right].$$

Последовательность формирования управления пространственным наведением такова:

- на момент t_j даётся оценка вектора

$$\text{состояния } \hat{x}(t_j) = x_{ECl}^j;$$

- производится расчёт совокупности параметров управления из условия приведения системы в конечное состояние (при $i = i_k$);

- после решения краевой задачи ведётся расчёт фактического движения КА на базе точных уравнений движения в оскулирующих элементах с учётом возмущений;

- по достижении момента t_{j+1} процесс повторяется, если норма прогнозируемого промаха превышает максимально допустимое значение.

Эффективность разработанных алгоритмов управления для межорбитальных перелётов исследовалась путём математического моделирования на ЭВМ динамики движения КА и процесса управления.

2.6. Задача оптимального управления эллиптической орбитой с учётом несферичности Земли и сопротивления верхних слоёв атмосферы

Рассматривается задача оптимального управления элементами орбиты КА, движущегося в поле сжатого сфероид с учётом сопротивления верхних слоёв атмосферы, плотность которой аппроксимируется экспоненциальным законом. Математическая модель движения содержит дифференциальные уравнения для изменения оскулирующих элементов орбиты, записанные в классической форме. На основе необходимых условий оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина найден закон изменения величины реактивного ускорения и угла ориентации тяги в плоскости орбиты, обеспечивающие минимум критерия оптимальности в задаче коррекции отклонений по радиусу перигея (апогея) и аргумента перицентра, вызванных влиянием сопротивления атмосферы.

Будем считать, что КА располагает регулируемым двигателем МТ, для которого не накладываются ограничения на величину реактивного ускорения. Направление вектора тяги относительно трансверсали характеризуется углом a_1 , положительное значение которого соответствует внешнему по отношению к трансверсали положению тяги. Трансверсальная a_x и радиальная a_y составляющие ускорения соответственно равны: $a_x = a \cos a_1$; $a_y = a \sin a_1$. В качестве критерия оптимальности перелёта с идеально ре-

гулируемым двигателем берётся интеграл от квадрата реактивного ускорения

$$J = \int_{t_0}^{t_k} a^2 dt \rightarrow \min .$$

Результаты численного решения поставленной вариационной задачи приведены на рис. 2.7 для орбиты с наклонением $i = 51^\circ$, высотой перигея 250 км, высотой апогея 350 км для двух моделей атмосферы, соответствующих максимуму и минимуму солнечной активности. На рис. 2.7,а показаны оптимальные программы изменения реактивного ускорения $a(\vartheta)$, угла ориентации тяги $\alpha_1(\vartheta)$ для случая коррекции возмущений перигейного расстояния от действия атмосферы на двух витках полета. В конечной точке $r_p(u_k) = r_{pk}$, где r_{pk} - номинальное перигейное расстояние в конечной точке, соответствующее движению под действием только гравитационных сил. На рис. 2.7,б показаны аналогичные зависимости при коррекции ошибок в апогейном расстоянии r_a от действия атмосферы на двух витках полета.

Сплошные линии соответствуют максимуму, а штриховые – минимуму солнечной активности. Оптимальное ускорение имеет различные максимумы в окрестности апогея орбиты и близко по направлению к трансверсальному (в точках максимума оно строго трансверсально), наименьшие значения уско-

рение имеет вблизи перигея. Сдвиг максимумов ускорения относительно апогея объясняется совместным действием атмосферы и нецентральности гравитационного поля. Характерно, что изменение модели плотности атмосферы приводит только к изменению величины реактивного ускорения и не влияет на программу изменения угла α_1 .

Результаты моделирования выявили колебательный характер как реактивного ускорения, так и угла ориентации тяги относительно трансверсали. Период колебаний соответствует периоду обращения на орбите. Влияние возмущений проявляется в увеличении модуля реактивного ускорения и смещении вдоль орбиты характерных точек, определяющих направление тяги. Исследование закономерностей этой эволюции позволяет строить близкие к оптимальным программы управления с учётом дополнительных факторов и возмущений и оценивать увеличение функционала J по сравнению с известным решением для центрального поля.

2.7. Приближённо-оптимальное управление элементами слабоэллиптических орбит

С использованием модели (1.27) [1] решены задачи оптимального управления «медленными» элементами орбиты на больших интервалах времени.

Сформулируем задачу об оптимальном управлении орбитой следующим образом:

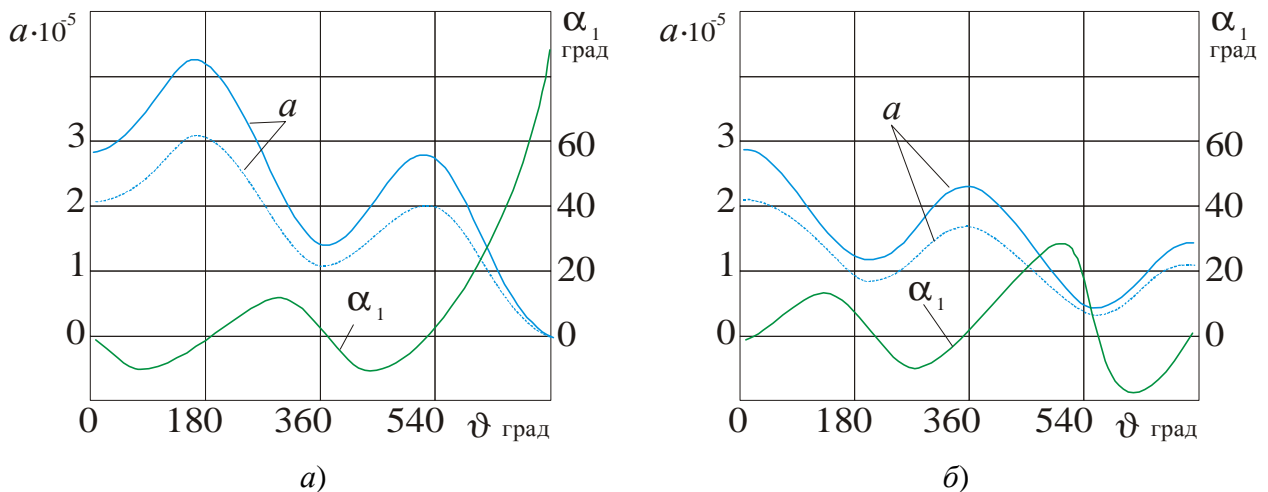


Рис. 2.7. Оптимальные программы управления:
 а - коррекция радиуса перигея; б - коррекция радиуса апогея
 (- - - с учётом атмосферы; — без учёта атмосферы)

определить параметры $x(t)$, $h(t)$, которые обеспечивают коррекцию элементов A , e , w , с помощью трансверсальной тяги за минимальное время при наличии на каждой витке пассивных участков. Суммарная продолжительность пассивных участков на витке считается заданной, а их расположение на орбите должно выбираться из соображений оптимальности.

Проведённый анализ позволяет сделать следующий вывод: структура оптимального управления для рассматриваемой задачи коррекции орбиты должна предусматривать два рабочих участка (разгонный и тормозной), центры которых разнесены на угол p по эксцентрической аномалии. Если на витке должен быть предусмотрен пассивный участок протяжённостью $2a_*$, то два пассивных участка шириной a_* должны разделить разгонный и тормозной участки. Расположение рабочих участков на витке будем характеризовать тремя параметрами: h - центр разгонного участка; x - половина его ширины; a_* - ширина одного пассивного участка. Таким образом, для оптимальной структуры управления имеем: $m = 1$; $n = 1$; $x_+ = x$; $h_+ = h$. Суммарная ширина пассивных участков $2a_*$, поэтому $x_- = p - a_* - x$; $h_- = h + p$. После подстановки в уравнения (1.27) получаем систему уравнений движения, описывающую

вековую эволюцию элементов орбиты при оптимальной структуре управления в пределах витка:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{4}{p} A \sqrt{\frac{A}{m}} a \left(x + \frac{a}{2} - \frac{p}{2} \right);$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{4}{p} \sqrt{\frac{A}{m}} a \cos \frac{a}{2} \sin \left(x + \frac{a}{2} \right) \cosh; \quad (2.24)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{4}{pe} \sqrt{\frac{A}{m}} a \cos \frac{a}{2} \sin \left(x + \frac{a}{2} \right) \sinh + BA^{-\frac{1}{2}}.$$

На рис 2.8 показаны результаты решения задачи управления элементами A , e , w . Параметры конечной орбиты соответствуют так называемой «стабильной» солнечно-синхронной орбите. Начальная орбита имеет параметры, изменяющиеся в пределах: $A_0 = 7025 \pm 60$ км; $e_0 \leq 0,017$; $w_0 = (11 \dots 83)^\circ$. Анализ полученного решения позволяет установить следующее свойство оптимальной по быстродействию коррекции орбиты: расположение рабочих участков относительно восходящего узла орбиты не изменяется по всей траектории. Это свойство позволяет находить оптимальное управление в результате решения двухпараметрической краевой задачи для системы дифференциальных уравнений (2.24) без привлечения сопряжённой

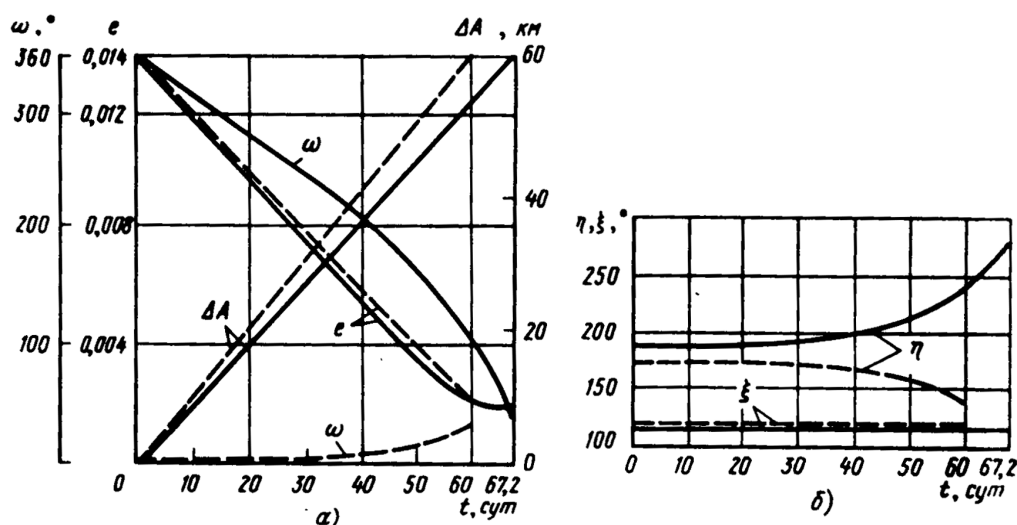


Рис 2.8. Изменение элементов орбиты для $a = 0.175 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ на оптимальной траектории (а) и параметров управления (б):
 - - - - для центрального поля, ——— с учётом несферичности Земли

системы уравнений. В результате решения параметрической краевой задачи рассчитываются следующие параметры управления:

$u_h = const$, характеризующий расположение середины разгонного рабочего участка относительно восходящего узла орбиты, и $x = const$, определяющий протяжённость разгонного рабочего участка на витке. Рассчитав по приближённой методике параметры управления для приведённых выше граничных условий, получим: $h = 162,1^\circ$; $x = 123^\circ$;

$t_K^* = 60,45$ сут. Таким образом, приближённое решение даёт погрешность по функционалу (времени манёвра) на 0,6 сут., что составляет всего 1 % от общего времени межорбитального перелёта.

Из рис. 2.8 видно, что сжатие Земли оказывает существенное влияние на характеристики оптимального процесса. Минимальное время коррекции здесь равно $t_K^* = 67,2$ сут. Зависимость $w(t)$ представляет собой монотонную функцию, близкую к линейной. Это объясняется тем, что при заданном уровне ускорения доминирующим фактором, определяющим изменение w , является прецессия орбиты, обусловленная влиянием второй зональной гармоники в разложении потенциала гравитационного поля Земли. Поскольку $i = 98^\circ$, то аргумент перигея уменьшается. Как показали расчёты, для оптимальной по быстрдействию коррекции элементов орбиты с учётом прецессии характерно, что аргумент широты центра разгонного участка изменяется по закону, близкому к линейному: $u_h \approx u_{h0} + BA^{-1/2}t$.

2.8. Приближённый метод расчета энергетики манёвра и параметров управления элементами орбиты

Управление элементами A, e, w . Получены формулы для затрат характеристической скорости $V_{xK}(t)$ при условии непрерывной работы двигателей ($a \equiv 0$). Для этого уравнения (1.27) представлены в виде конечных приращений, и из этих уравнений получена формула для V_{x1} :

$$V_{x1} = \frac{p|\Delta e|}{4 \sin x_1} \sqrt{\frac{m}{A_{\delta}} (1 + tg^2 h_1)} = \frac{p|\Delta e|}{4 \sin x_1} \sqrt{\frac{m}{A_{\delta}} \left[1 + \frac{\Delta w_a^2}{\ln^2(1 + \Delta e/e_0)} \right]}. \quad (2.25)$$

На рис. 2.9,а показана зависимость (2.25) в виде изолиний «приведённой» характеристической скорости:

$$V_{x1} \% = \frac{4}{\pi e_0} \sqrt{\frac{\mu}{A_{cp}}} \sin \xi \cdot V_{x1}$$

в координатах Δw_a и $\Delta e/e_0$. Полученная зависимость является универсальной и может быть использована на стадии проектно-баллистических расчётов при определении затрат рабочего тела на манёвр коррекции. По существу это изолинии функции «будущих потерь» – критерия оптимальности V_x в задаче оптимизации плоских манёвров в центральном поле.

Управление элементами Ω, i . Из уравнений (1.27) с помощью аналогичного приёма приведения к конечным приращениям получим

$$V_{x2} = \frac{\pi|\Delta i|}{2} \sqrt{\frac{\mu}{A_{cp}} \left(1 + \frac{\Delta \Omega_a^2}{\ln^2 \left| tg \frac{i_0 + \Delta i}{2} ctg \frac{i_0}{2} \right|} \right)} \approx \frac{\pi|\Delta i|}{2} \sqrt{\frac{\mu}{A_{cp}} \left(1 + \frac{\Delta \Omega_a^2 \sin^2 i_{cp}}{\Delta i^2} \right)}. \quad (2.25')$$

На рис. 2.9,б зависимость (2.25') представлена в виде изолиний $V_{x2} = const$ в координатах $\Delta \Omega_a$ и $Di \sin^{-1} i_{\bar{n}\delta}$. Получено аналитическое выражение для оценочной функции $j: \tilde{f}^{(0)}(x, t) = \tilde{f}_1^{(0)}(A, e, w) + \tilde{f}_2^{(0)}(i, \Omega)$, где первое слагаемое соответствует приближённому решению задачи о минимуме характеристической скорости плоского межорбитального манёвра

$$\tilde{f}_1^{(0)} = - \frac{p(e_K - e)}{4 \sin x(A, e)} \sqrt{\frac{m}{A_{cp}}} \sqrt{1 + \frac{(w_K - w)^2}{\ln^2 \frac{e_K}{e}}}, \quad (2.26)$$

а второе – приближённому решению задачи оптимального поворота плоскости орбиты

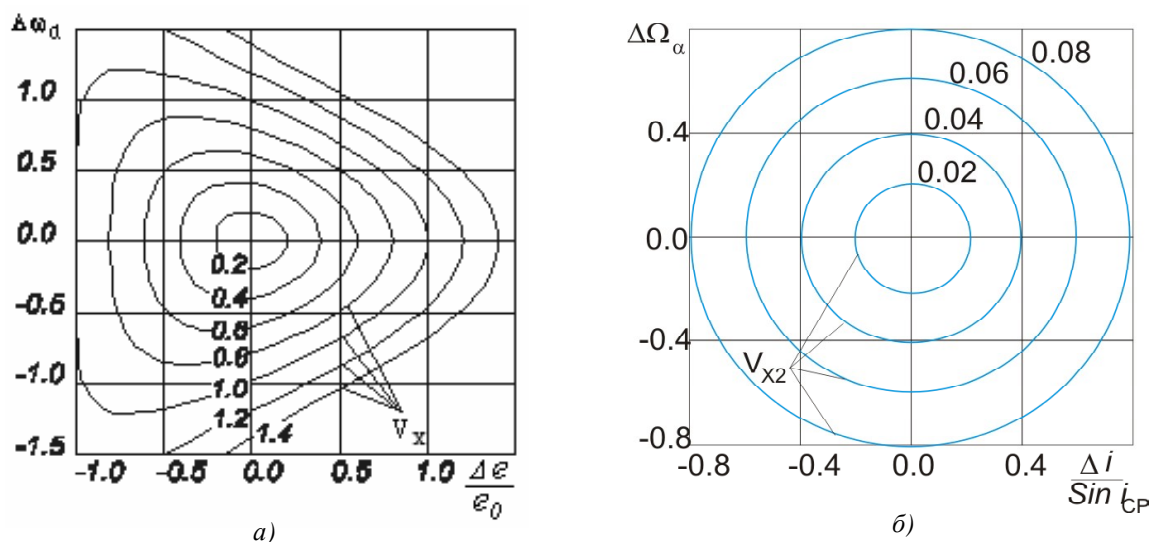


Рис. 2.9. Затраты характеристической скорости на манёвры

$$\Phi_2^{(0)} = -\frac{\pi(i_K - i)}{2} \sqrt{\frac{\mu}{A_{cp}}} \cdot \sqrt{1 + \frac{(\Omega_K - \Omega)^2 \sin i_{cp}}{(i_K - i)^2}}. \quad (2.27)$$

Оценка любых допустимых управлений $\tilde{u}(t, x)$ может быть проведена на основе функций $j_1^{(0)}, j_2^{(0)}$ [1].

2.9. Задача оптимальных перелётов между орбитами с большими эксцентриситетами

Рассмотрены два варианта ориентации вектора тяги: свободная и по трансверсали.

Для варианта свободной ориентации получена квазиоптимальная программа управления на витке

$$\tilde{q}_{opt}^* = \arctg \left\{ \frac{\sin E}{2(K + \cos E)} \right\}, \quad (2.28)$$

где $K(t)$ - параметр управления, являющийся медленной переменной; q - угол, характеризующий ориентацию тяги в плоскости орбиты; E - эксцентрисическая аномалия.

Для трансверсальной ориентации было показано, что оптимальная структура управления на витке должна содержать не более двух активных участков разного знака, разделённых равными пассивными участками.

Функция включения тяги d определяется следующим образом:

$$d = \frac{1}{2} \{ \text{sign}[(E - h - x - a)(E - h - 2p + a + x)] - \text{sign}[(E - h)^2 - x^2] \} \quad (2.29)$$

где x - протяжённость в угловой мере половины разгонного участка, a - протяжённость в угловой мере одного пассивного участка, h - угловое расстояние центра разгонного участка относительно перицентра.

Проводилось численное решение оптимизационных задач принципом максимума Понтрягина для обоих вариантов управления вектором тяги. На рис. 2.10 представлены результаты решения задачи о переходе КА с низкой круговой орбиты на орбиту спутника “Молния” при трансверсальной ориентации вектора тяги для различных значений общего времени перелёта.

Полученные решения позволили построить для ряда баллистических задач области достижимости при фиксированных затратах характеристической скорости. Для орбиты спутника “Молния” построены области корректируемых параметров в координатах “большая полуось – эксцентриситет”. Показано, что выигрыш в характеристической скорости при свободной ориентации вектора тяги по сравнению с трансверсальной ориентацией может быть значительным (рис. 2.11).

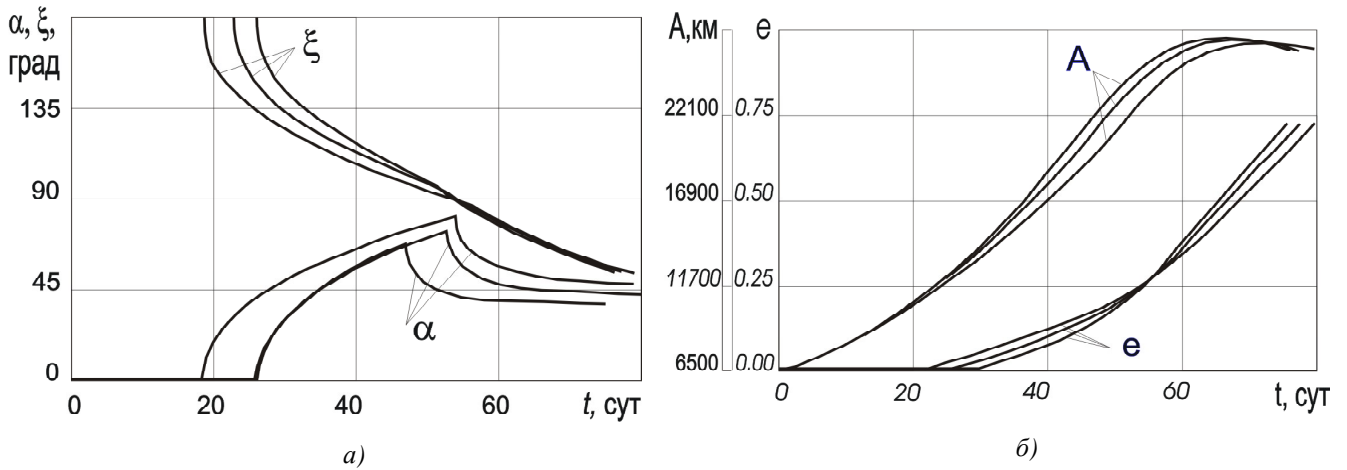


Рис. 2.10. Параметры управления и оскулирующие элементы для перехода на высокоэллиптическую орбиту

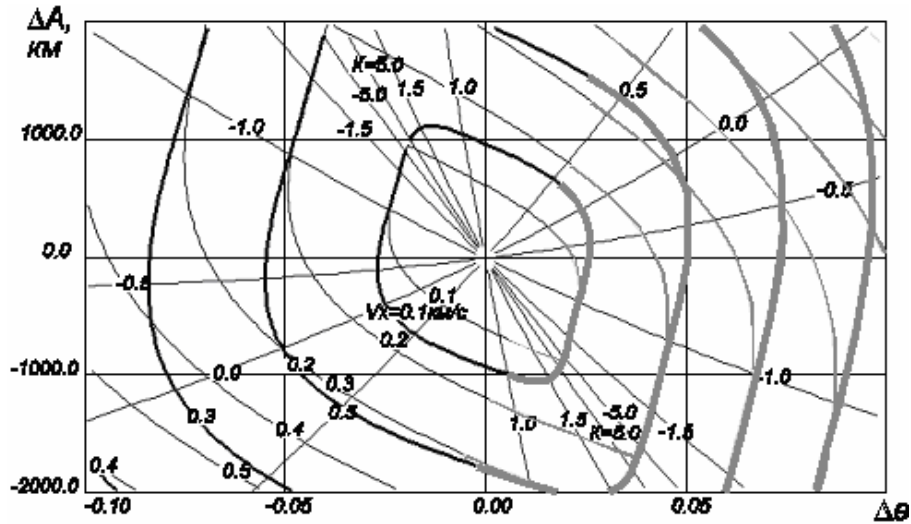


Рис. 2.11. Области достижимости для начальной орбиты с параметрами: $A=26621$ км, $e=0,74$,
 — свободная ориентация вектора тяги, — трансверсальная

2.10. Задача наведения КА в расчётную точку околокруговой орбиты

Рассмотрим задачу наведения КА в заданную точку орбиты для случая малого эксцентриситета e . Параметрами движения можно считать только большую полуось A и относительное положение спутника на орбите, определяемое параметром Δu . Запишем уравнения движения:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{4}{p} \sqrt{\frac{A^3}{m}} a_1 \left(x - \frac{p}{2} \right),$$

$$\frac{d\Delta u}{dt} = \sqrt{m} (A^{-1.5} - A_K^{-1.5}). \quad (2.30)$$

С использованием формализма принципа максимума Понтрягина для задачи оптимального с точки зрения быстрейшего управления элементами A и Δu получено, что оптимальная структура управления содержит не более одного разгонного ($x = p$) и одного тормозного ($x = 0$) участков на витке. Исходя из этого, будем характеризовать оптимальное управление следующими параметрами:

t_k - момент окончания манёвра; t_f - момент переключения тяги; $x_0 = \{0, p\}$ - параметр, характеризующий направление тяги в начальный момент движения. Проинтегрировав первое уравнение в (2.30), получим выражение для момента окончания манёвра:

$$t_k = \frac{p\sqrt{m}}{a_1(2x_0 - p)} \left(\frac{1}{\sqrt{A_k}} - \frac{1}{\sqrt{A_0}} \right) + 2t_f. \quad (2.31)$$

Подставив текущее значение большой полуоси во второе уравнение (2.30) и проинтегрировав его, получим следующее соотношение для определения времени переключения направления тяги:

$$\Delta\bar{u} + 2\sqrt{mA_k^{-1.5}}t_f + \frac{pm}{2a_1(2x_0 - p)} \times \left[\left(\frac{1}{\sqrt{A_0}} - \frac{a_1(2x_0 - p)}{p\sqrt{m}} t_f \right)^4 + 1,5A_k^{-2} - 0,5A_0^{-2} - A_0^{-0,5}A_k^{-1,5} \right] = 0, \quad (2.32)$$

где $\Delta\bar{u} = \Delta u_k - \Delta u_0 + 2pn$, n - число витков в относительном движении (в общем случае неизвестно и выбирается так, чтобы обеспечить наименьшее конечное время t_k).

На рис. 2.12 представлены изолинии затрат характеристической скорости V_x на поле ΔA , $\Delta\bar{u}$ для $A_k = 7030$ км и $a_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ м/с².

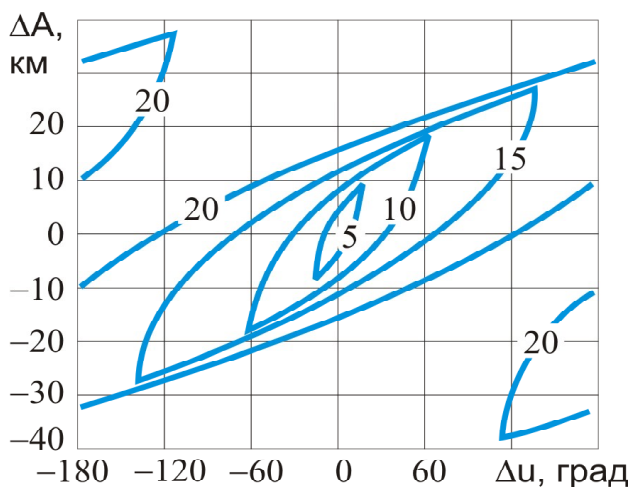


Рис. 2.12. Области достижимости в отклонениях по ΔA , $\Delta\bar{u}$

2.11. Задача коррекции орбиты спутника Земли с учётом неопределённости силы сопротивления верхних слоев атмосферы

Как уже отмечалось, особенностью движения КА на низких околоземных орбитах является неопределённость возмущающей силы аэродинамического сопротивления, обусловленная неточностью знания баллистического коэффициента s_x и плотности атмосферы. Для оценки возмущающего ускорения использовалась изотермическая модель плотности, в которой высота однородной атмосферы H изменяется в зависимости от уровня солнечной активности. Баллистический коэффициент изменяется в зависимости от текущего аргумента широты u .

Средняя за виток величина реактивного ускорения \hat{a} , компенсирующего влияние аэродинамических возмущений, определяется путём взятия интеграла от $|f_a|$ на интервале, равном периоду обращения. Результаты расчёта \hat{a} для $s_x = 0.002$ м²/кг приведены в табл. 2.2.

Получены приближённые аналитические решения для расчёта параметров «корректирующего импульса», создаваемого двигателем МТ. Показано, что одновременная коррекция большой полуоси и перигейного расстояния при одном активном участке на витке принципиально возможна в ограниченной области параметров, характеризующейся отношением корректируемых ошибок.

Рассмотрим более подробно коррекцию элементов орбиты трансверсальным реактивным ускорением ($a = const$, $a \equiv 0$). Пусть $m = 1$. Исследуем принципиальную возможность одновременной коррекции двух элементов орбиты при одном активном участке на витке. Для примера рассмотрим одновременную коррекцию оскулирующего периода T и перигейного расстояния r_p . В этом случае необходимо решить систему уравнений:

Таблица 2.2. Результаты расчёта среднего «компенсирующего» реактивного ускорения

Параметры орбиты		Минимальный уровень солнечной активности $\left(F_0 = 75 \cdot 10^{-22} \frac{Bm}{m^2 \Gamma_{\text{ц}}}\right) \hat{a}_H \cdot 10^5, \text{ м/с}^2$	Максимальный уровень солнечной активности $\left(F_0 = 250 \cdot 10^{-22} \frac{Bm}{m^2 \Gamma_{\text{ц}}}\right) \hat{a}_H \cdot 10^5, \text{ м/с}^2$
высота перигея $H_p, \text{ км}$	высота апогея, $H_a, \text{ км}$		
250	350	0.68	1.556
350	350	0.035	0.325

$$\Delta r_p = \frac{ap_0^3}{m\sqrt{(1-e_0)^5}} [(4-e_0)x] - 4 \sin x \cos h + \frac{e_0}{2} \sin 2x \cos 2h, \quad (2.33)$$

$$\Delta T = 12pap_0^3 \sqrt{p_0} x / m\sqrt{m(1-e_0)^3}.$$

Выражая ускорение из (2.33), после преобразований получим

$$x = B \left[(4-e_0)x - 4 \sin x \cos h + \frac{e_0}{2} \sin 2x \cos 2h \right],$$

где $B = \frac{\Delta A}{4\Delta r_p}$ является функцией отношения

корректируемых ошибок. Тривиальное решение $x = 0$ соответствует отсутствию коррекции.

Если параметр B известен, то можно определить предельную координату середины активного участка $h_{ID\dot{A}\dot{A}}$, при которой коррекция таких ошибок возможна:

$$h_{ID\dot{A}\dot{A}} = \arccos \left[\frac{1}{e_0} \left(1 - \sqrt{(1-e_0)^2 + e_0 / 2B} \right) \right]. \quad (2.34)$$

Таким образом, одновременная коррекция оскулирующего периода (большой полуоси) и перигейного расстояния при одном активном участке на витке принципиально возможна в ограниченной области параметров, характеризуемой отношением корректируемых ошибок. Если $B < 1/8$, такая коррекция невозможна. Если $B \in \left[\frac{1}{e_0}, \frac{1}{4-e_0} \right]$, то

расположение активного участка должно выбираться в области: $\cos h \leq \cos h_*$. Этот результат объясняется следующим образом. Если соотношение между корректируемыми ошибками таково, что преобладает ошибка по большой полуоси ΔA , то активный участок следует располагать ближе к перигею, чтобы большая ошибка ΔA ликвидировалась за счёт увеличения апогейного расстояния. Если же преобладает ошибка в перигейном расстоянии, то целесообразно исправить её, располагая активный участок ближе к апогею. Это хорошо согласуется с известными результатами по импульсной коррекции эллиптических орбит. Наконец, если ошибка в перигейном расстоянии превосходит некоторый «критический» уровень по отношению к ошибке ΔA , то решение задачи в рамках одного активного участка невозможно.

2.12. Метод выбора универсальных параметров двигателя малой тяги, предназначенного для поддержания низкой орбиты спутника Земли

Характерной особенностью задачи выбора проектных параметров ЭРД, предназначенного для поддержания низких околоземных орбит, является многоцелевое назначение двигателя, а также многорежимный характер выполнения каждой коррекции.

Задачу поддержания орбиты будем формулировать как задачу ликвидации вековых возмущений периода обращения T , возникающих из-за действия силы аэродинамического сопротивления.

Весь интервал управления разобьём на N равных частей, каждая из которых состоит из m пассивных и n активных витков. На активных витках ЭРД создаёт постоянное по

величине реактивное трансверсальное ускорение a_r . В результате за $(m+n)$ витков период обращения восстанавливается с некоторой избыточностью (рис. 2.13).

В качестве критерия оптимальности выберем относительную полезную массу m , а оптимизируемыми параметрами ЭРД будем считать скорость истечения рабочего тела c и реактивное ускорение a_r . Предложен метод решения задачи выбора ограниченного числа s двигательных установок МТ, предназначенных для гарантированного поддержания некоторого множества орбит Y . Орбиту будем характеризовать высотой перигея h_p , высотой апогея h_a и наклоном орбиты i .

Систему двигательных установок $\Gamma = \{p_1, p_2, \dots, p_s\}$ будем считать универсальной для поддержания множества орбит Y , если:

- 1) система Γ может решить задачу поддержания любой орбиты $y \in Y$,
- 2) максимальная степень неоптимальности для любого двигателя системы минимальна.

Величина

$$r(y, p') = \frac{\max_p m(y, p, v_H)}{m(y, p', v_B)} \quad (2.35)$$

характеризует степень неоптимальности двигателя с параметрами p' , поддерживающего орбиту y при высоком уровне плотности атмосферы ($v = v_B$), по сравнению с двигате-

лем, специально спроектированным для выполнения этой задачи при низком уровне плотности ($v = v_H$).

За цикл коррекции управление должно полностью компенсировать действие возмущающей аэродинамической силы. Уровень реактивного ускорения a_r , необходимый для поддержания орбиты:

$$\dot{a}_e = a_e(h_p, n) = \frac{[2(m+n)-1] m \sqrt{m}}{24 p^2 n A^3 \sqrt{A(1-e^2)}} d\Gamma(h_p, n). \quad (2.36)$$

Соответственно, характеристическая скорость за всё время составит

$$V_{x_e} = V_x(h_p, n) = \frac{[2(m+n)-1] m \sqrt{m} \epsilon}{24 p^2 n A^3 \sqrt{A(1-e^2)}(m+n)} d\Gamma(h_p, n). \quad (2.37)$$

Оптимальное значение скорости истечения при коррекции периода обращения определяется только циклограммой работы двигателя и не зависит от орбиты и внешних условий полета. Это существенно облегчает решение задачи универсализации, так как позволяет выбрать скорость истечения, оптимальную для всего множества орбит Y .

Конкретизируем выражение для степени неоптимальности (2.35) и с учётом выражений (2.26), (2.27) получим

$$r(h_p, a, c) = \frac{1 - dd\Gamma_H(h_p)}{1 - J/c - g \frac{ac}{2}}, \quad (2.38)$$

где

$$d = \frac{[2(m+n)-1]}{12 p^2 A^3} \sqrt{g t_H K^3 / 2n(m+n)A(1-e^2)}. \quad (2.39)$$

Максимальное значение функции r при гарантированном поддержании диапазона орбит Y зависит от границ диапазона и будет равно

$$\bar{r} = \max_{h_p \in [h_{p \min}, h_{p \max}]} r(h_p, a, c) = \frac{1 - dd\Gamma_H(h_{p \max})}{1 - J/c - g \frac{ac}{2}}. \quad (2.40)$$

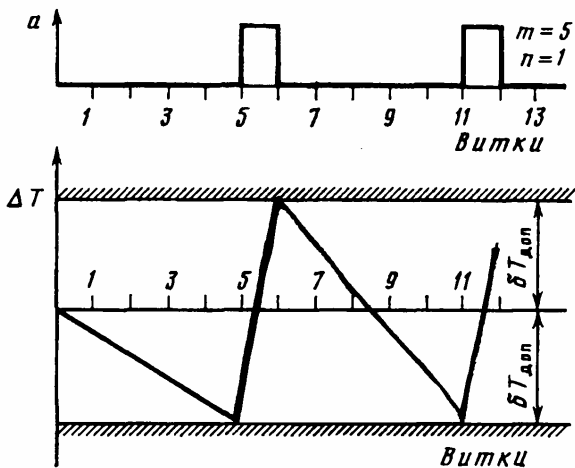


Рис. 2.13. Циклограмма включения ЭРД при поддержании периода обращения ($m = 5, n = 1$)

Изменение периода на одном витке пропорционально величине баллистического коэффициента S_x и зависит от плотности атмосферы и параметров орбиты. Для расчёта уменьшения периода обращения на одном витке $dT(h_{pV})$ можно использовать аппроксимационные формулы.

На рис. 2.14 приведены «предельные» зависимости: $dT_n(h_p)$, которая соответствует минимальной плотности атмосферы, и $dT_g(h_p)$, которая соответствует максимальной плотности атмосферы, полученные путём обработки результатов численного моделирования движения КА с использованием модели плотности по ГОСТ 22721-77 для высоты апогея $h_a=350$ км и наклона $i = 51^\circ$.

В рассматриваемом примере минимальная гарантированная степень неоптимальности $F^{(2)} = 1,0696$ при применении двух разнотипных ЭРД. При этом весь диапазон высот перигея разбивается на два поддиапозона. При $h_p \in [160, 173]$ км двигатель первого типа должен обеспечить реактивное ускорение $a_1 = 7,9 \cdot 10^{-4}$ м/с², а при $h_p \in (173, 240]$ км двигатель второго типа должен обеспечить реактивное ускорение $a_2 = 6,22 \cdot 10^{-4}$ м/с². Оптимальное значение скорости истечения c_{opt} для рассмотренного примера равно 36,25 км/с. Отметим, что при использовании для всего диапазона манёвров первого типа двигателя, располагающего большим реак-

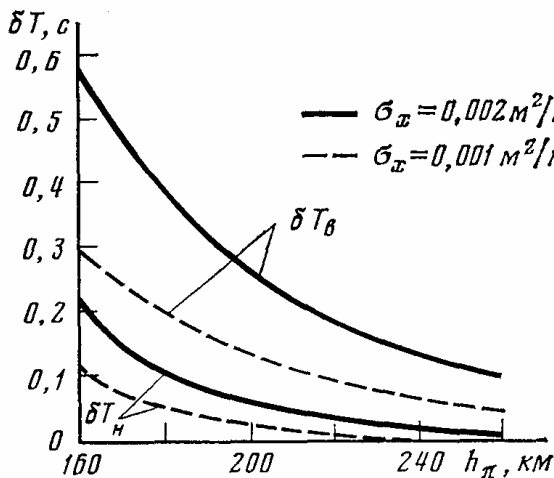


Рис. 2.14. Границы изменения периода обращения на одном витке

тивным ускорением, степень неоптимальности равна $F^{(1)} = 1,091$. Результаты анализа показали, что дальнейшее увеличение числа двигателей (больше двух) практически не уменьшает гарантированную степень неоптимальности.

2.13. Оптимальное управление относительным движением КА с помощью двигателей МТ

Представим исходную задачу, описанную в [1] моделью (1.31), в виде последовательности менее сложных задач, допускающих аналитические решения.

Система (1.31) с помощью замены:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= r_1^{-1}(\Delta r + I_1^{-1} \Delta V_u), \\ \bar{x}_2 &= -\frac{1}{3}(\Delta u - 2I_1^{-1} r_1^{-1} \Delta V_r), \quad t = I_1 t \end{aligned}$$

приводится к канонической форме, использование которой позволяет получить решение задачи об оптимальном по быстродействию переводе её из произвольного начального состояния в начало координат:

$$\begin{aligned} a_T &= -a \operatorname{sign} \left[\bar{x}_2 + \frac{\bar{x}_1 \bar{x}_2}{2\bar{a}} \right] = \\ &= -a \operatorname{sign} \left[-\frac{1}{3}(\Delta u - 2I_1^{-1} r_1^{-1} \Delta V_r) + I_1^2 \frac{(\Delta r + I_1^{-1} \Delta V_u) \Delta r + I_1^{-1} \Delta V_u}{2\bar{a} r_1} \right]. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Структура оптимального управления содержит лишь одно переключение. Для этого случая имеем точную оценку продолжительности манёвра ($\Delta V_r \equiv 0$ и $\Delta V_u \equiv 0$), являющуюся по существу функцией будущих потерь:

$$T_{H \min} = \min_{d(0)} \left\{ I_1^{-1} \left(-\frac{\Delta r_1 I_1^2}{ad(0)} + 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta r_1(0) I_1^2}{a} \right)^2 + \frac{\Delta u_0 I_1^2 r_1}{3ad(0)}} \right) \right\} \quad (2.42)$$

Для продольного относительного движения характерным является наличие периодических и вековых составляющих. При отсутствии возмущений один КА будет двигаться относительно другого в плоскости $(\Delta r, \Delta L)$ по эллипсу, центр которого смещается с постоянной скоростью. Параметры, ха-

рактически характеризующие смещение эллипса и размер его полуоси, можно считать вековыми, а характеризующие положение КА на эллипсе - периодическими.

Введём переменные: Δr_{cp} - среднее смещение вдоль радиуса; ΔL_{cp} - среднее смещение вдоль орбиты; l - малая полуось эллипса относительного движения КА в плоскости орбиты; l_z - амплитуда взаимных колебаний аппаратов в боковом направлении; j, j_z - углы, характеризующие положения КА на эллипсе относительного движения (рис. 2.15). Дифференциальные уравнения относительного движения примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta r}_{cp} &= \frac{2}{\lambda} a_T, \quad \dot{\Delta L}_{cp} = -\frac{3}{2} \lambda \Delta r_{cp} - \frac{2}{\lambda} a_S, \\ \dot{\varphi} &= \lambda + \frac{1}{\lambda l} (a_S \cos \varphi - 2 a_T \sin \varphi), \\ \dot{l} &= \frac{1}{\lambda} (a_S \sin \varphi + 2 a_T \cos \varphi), \\ \dot{l}_z &= \frac{1}{\lambda} a_w \cos \varphi_z, \quad \dot{\varphi}_z = \lambda - \frac{1}{\lambda l_z} a_w \sin \varphi_z. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Для системы (2.43) получено оптимальное в смысле быстрогодействия управление для совместного изменения элементов продольного движения:

$$tg a_{opt} = \frac{-2y_L + y_l \sin j + l^{-1} y_j \cos j}{2y_r + 2y_l \cos j - 2l^{-1} y_j \sin j}. \quad (2.44)$$

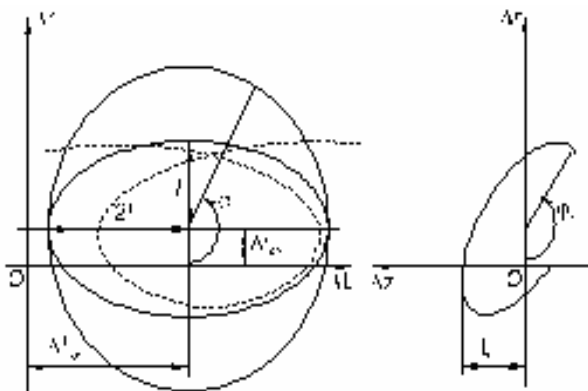


Рис. 2.15. Параметры относительного движения $\Delta r_{cp}, \Delta L_{cp}, l, l_z, j, j_z$

Стратегия управления вековыми и периодическими составляющими состоит из следующих этапов с соответствующими граничными условиями:

- управление вековыми составляющими Δr_{cp} и ΔL_{cp} : $\Delta r_{cp}(t_k) = 0, \quad \Delta L_{cp}(t_k) = 0$;
- коррекция амплитуды боковой составляющей относительного движения: $l_z(t_k) = 0$;
- коррекция амплитуды периодической составляющей $\Delta L(t_k) = 0$.

Некоторые результаты моделирования по этой стратегии представлены на рис. 2.16, где показаны проекции пространственной траектории относительного движения на продольную и боковую плоскости. Точкой с координатами (0, 0, 0) показано положение пассивного КА с высотой базовой орбиты $H_0 = 3000$ км. Ускорение тяги двигателя маневрирующего КА $a_0 = 10^{-4}$ м/с². На верхней части (рис. 2.16, а) показан начальный этап формирования спутниковой системы сопровождения. На нижней части (рис. 2.16, б) приведена проекция траектории относительного движения на боковую плоскость в момент коррекции амплитуды боковой составляющей. Для уменьшения амплитуды с 11 до 3 км потребовалась непрерывная работа двигательной установки в течение 8 орбитальных витков.

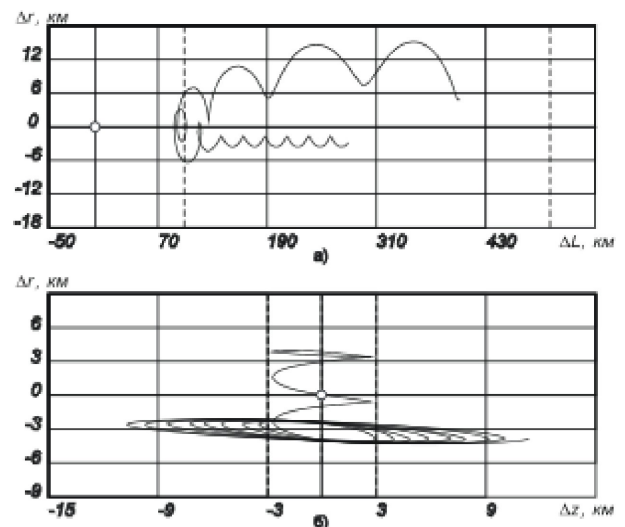


Рис. 2.16. Результаты моделирования

2.14. Оптимизация проектных параметров маневрирующего КА сопровождения

Представим полную массу активного КА II в виде суммы масс отдельных его компонентов в соответствии с массовой моделью, описанной в [1]. В качестве критерия оптимальности примем относительную массу полезного груза $m = \frac{M_{\text{пг}}}{M_0}$.

$$m = \frac{M_{\text{пг}}}{M_0}$$

Стратегию гарантирующего управления выбираем в следующем виде. Пусть КА II находится в заданном диапазоне смещений вдоль орбиты с отклонением по среднему радиусу $\Delta r_{cp} \neq 0$. Активный аппарат в относительном движении эволюционирует, смещаясь вдоль орбиты (рис. 2.17). В точке "1"

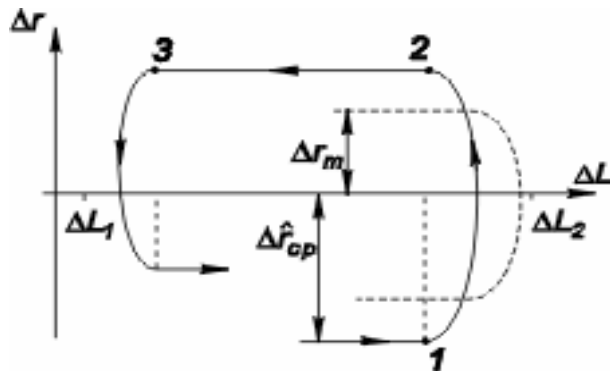


Рис. 2.17. Управление относительным движением

($\Delta L = \Delta L_{p1}$), находящейся внутри заданного диапазона, включается двигательная установка аппарата, и он переводится в точку "2" с гарантированным изменением знака Δr_{cp} . После этого КА II начинает дрейфовать в противоположную сторону. В точке "3" ($\Delta L = \Delta L_{p0}$) тяга двигателей включается на торможение, и КА II переходит на орбиту с меньшим, чем у пассивного КА I, средним радиусом. Затем процесс повторяется. В процессе дрейфа при необходимости осуществляется коррекция полуоси эллипса взаимного движения.

Проведено имитационное моделирование работы алгоритмов управления на различных режимах полета. Выбор оптимальных параметров, определяющих проектный облик КА II, будем проводить поэтапно, используя на каждом следующем этапе более полную и точную модель объекта. Результаты изменения проектных и баллистических характеристик по итерациям для орбиты со средней высотой 660 км приведены в табл. 2.3. Оказалось достаточно трёх итераций. При этом критерий оптимальности m изменяется не очень существенно (на 3...6%), но основной проектный параметр a_0 меняется на 10...12% по сравнению с первоначальным значением.

Таблица 2.3. Изменение оптимальных параметров по итерациям $A_k = 7030$ км, $i = 98^\circ$, $\Delta A_{\text{max}} = \pm 60$ км, $\Delta e_{\text{max}} = 0,02$, $T_{PEC} = 10^4$ час, $T_{\text{форм.}} = 30$ сут, $\Delta r'_{\text{max}} = 1,2$ км, $\Delta L'_{\text{max}} = 125$ км, $g_{\text{ЗУ}} = 50$ кг/кВт, $g_{\text{ДУ}} = 48$ кг/Н

Итерации	Расчёт энергетики маневра по верхней оценке V_x	Модель центрального поля. «Идеальный» предельный цикл поддержания $\Delta r_{\text{max}} = 1,5$ км, $\Delta L_{\text{max}} = 150$ км	Учёт несферичности Земли. Синтез циклограммы с учётом амплитуды колебаний	Численное моделирование манёвра
$a_0 \cdot 10^5, \text{ м/с}^2$	9,91	10,72	8,08	8,08
$c, \text{ км/с}$	38,7	38,9	38,9	38,9
m	0,85	0,83	0,803	0,817
Продолжительность формирования $T_{\text{форм.}}$, сут	18,0	17,6	19,8	19,7
Число коррекций, n ($t_n = 1$ сут)	-	-	2	2
Моторное время этапа поддержания $T_{\text{м2.}}$, час	9570	9580	9574	9163
Общее число включений ЭРД, $n_{\text{вкл}}$	2129	2303	2166	2220
Средняя продолжительность одного включения, $\Delta t_{\text{вкл.}}$, час	4,49	4,16	4,42	4,13
Средняя продолжительность паузы, $\Delta t_{\text{п.}}$, час	16,1	14,87	15,82	15,61

2.15. Задача оптимизации межпланетных перелётов с МТ

Оптимальное управление КА на гелиоцентрических участках определяется по уравнениям (1.26) или (1.35) [1] в зависимости от используемой модели движения согласно принципу максимума Понтрягина.

В зависимости от граничных условий перелётов и целевого функционала возможны различные постановки краевых задач: оптимальные по быстродействию или расходу; с фиксированной угловой дальностью перелёта или нет.

Вариационная задача об оптимальных по критериям минимума приведённого рабочего времени или быстродействию гелиоцентрических перелётах сводится к двухточечным четырёхпараметрическим (для модели А) или шестипараметрическим (для модели Б) краевым задачам [2]. Получены оптимальные законы управления и баллистические параметры для различных межпланетных перелётов. На рис. 2.18 показаны оптимальные гелиоцентрические траектории достижения планет Солнечной системы для КА с ЭРД с солнечным источником энергии, полученные для модели А.

Расчёт планетоцентрических манёвров набора скорости и торможения КА проводится с использованием трансверсального закона управления и эмпирических зависимостей

расхода рабочего тела и длительности манёвра от проектных параметров, полученных в [2].

Планетоцентрическое движение КА в рамках модели Б рассчитывалось в комбинированной системе координат (1.35) [1] с учётом возмущений от нецентральности поля сил тяготения планет, воздействия атмосферы и затенения панелей СБ (рис. 2.19). Для расчёта пространственного манёвра набора параболической скорости использовался трансверсальный закон управления тягой двигателей с отклонениями тяги от плоскости орбиты с переключением знака бинормальной составляющей тяги дважды за виток.

В процессе моделирования движения на планетоцентрических участках траектории было установлено, что наиболее существенное влияние на баллистические характеристики манёвров набора параболической скорости и торможения оказывает время пребывания КА в тени планеты. Значительное увеличение длительности манёвра (более чем на 20 %) приводит к изменению гелиоцентрических координат КА в момент выхода из сферы действия планеты, что, в свою очередь, существенно влияет на траекторию и проектно-баллистические параметры межпланетного перелёта (оптимальное управление, расход РТ и др.).

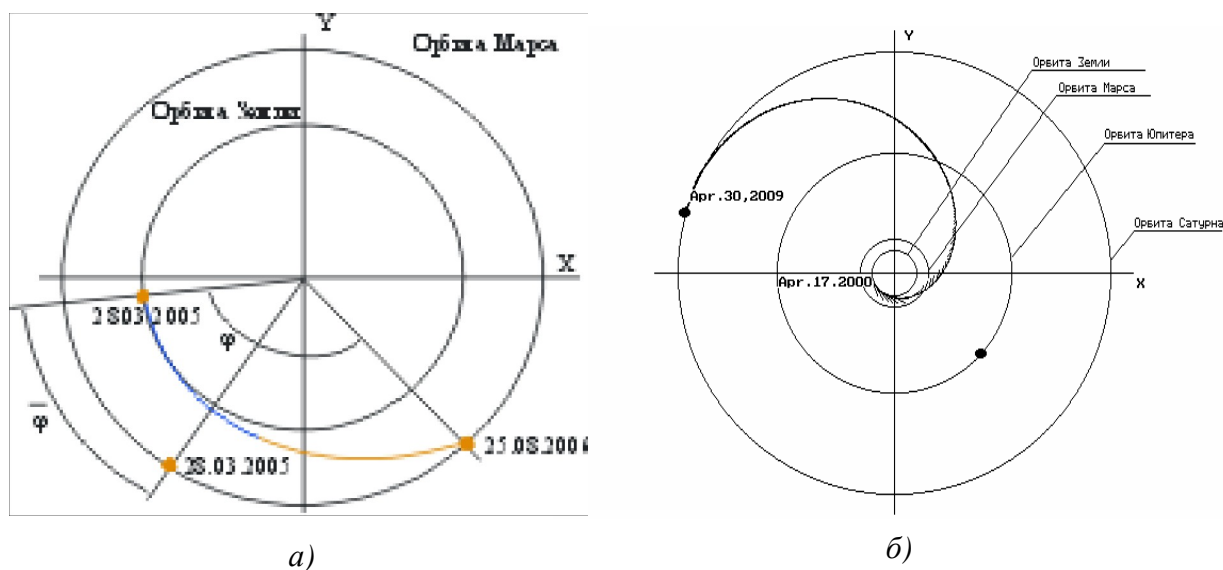


Рис. 2.18. Примеры оптимальной пролётной гелиоцентрической траектории (а) и траектории с выравниванием скоростей (б)

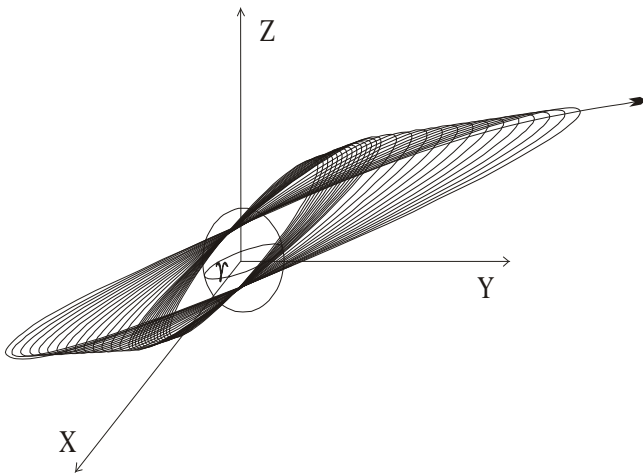


Рис. 2.19. Траектория участка набора параболической скорости

Алгоритм оптимизации замкнутых межпланетных перелётов основан на последовательном моделировании участков плането- и гелиоцентрических участков движения с их стыковкой, предусмотренной в рамках используемой модели движения при заданных значениях проектных и баллистических параметров, и последующем решении задачи математического программирования для определения их оптимальных значений. В качестве баллистических параметров выбраны: t - отношение длительности прямого перелёта к суммарной продолжительности замкнутого перелёта, \bar{j} - относительное угловое расположение Земли и Марса (определя-

ет дату старта). Проектными параметрами, описывающими облик КА, являются: P - тяга и c - скорость истечения двигателей МТ.

Результаты проектно-баллистической оптимизации замкнутого перелёта Земля-Марс-Земля, выполняемого КА с солнечной энергетической установкой и двигателями малой тяги, представлены на рис. 2.20.

В таблице 2.4 показано изменение результатов комплексной оптимизации перелёта, полученных при использовании различных моделей движения.

На рис. 2.21 показана оптимальная баллистическая схема пилотируемой экспедиции Земля – Марс – Земля, соответствующая проектно-баллистическим параметрам: $t = 0,456$, $P = 350$ Н, $c = 70$ км/с. Траектории получены с учетом эллиптичности и некомпланарности орбит планет для оптимальных дат старта. При этом учтены специфические ограничения на минимальное гелиоцентрическое расстояние (средний радиус орбиты Венеры) и продолжительность пилотируемой экспедиции ($T = 770$ суток), обеспечивающие безопасность экипажа.

Заключение

Описанные выше теоретические результаты нашли практическое использование.

Научный коллектив выполнил ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заданиям ведущих предпри-

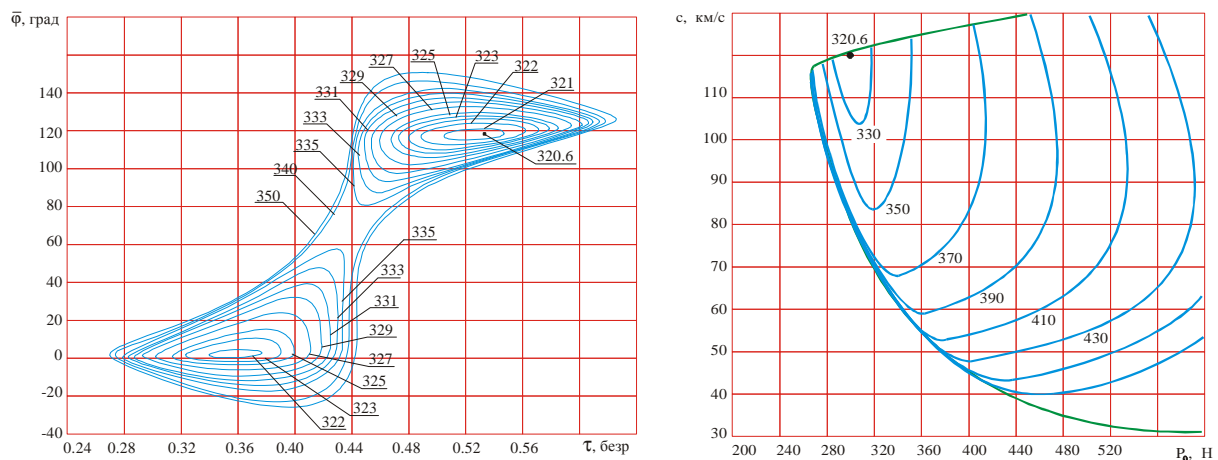


Рис. 2.20. Изолинии стартовой массы КА на поле баллистических параметров \bar{j}, t и на поле проектных параметров $p = \{P_0, c\}$ для пилотируемой экспедиции Земля-Марс-Земля

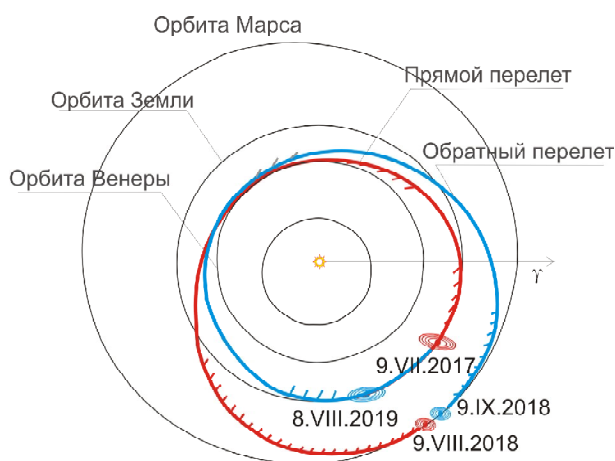


Рис. 2.21. Оптимальная баллистическая схема экспедиции Земля-Марс-Земля

ятий ракетно-космической отрасли: РКК «Энергия», ЦНИИМАШ, ГНП РКЦ «ЦСКБ – Прогресс», НИИ электромеханики и других. Результаты научных разработок использовались при проектировании ряда изделий ракетно-космической техники. В частности:

- разработаны технические предложения и сформирован принципиальный проектный облик и алгоритмы управления для орбитального КА сопровождения с длительным сроком функционирования;

- разработано техническое задание и проведены проектные исследования межор-

битального многоцветного буксира с ЭРДУ, предназначенного для транспортировки крупногабаритных конструкций малой жёсткости на удалённые орбиты;

- проведены исследования и даны технические предложения по увеличению сроков активного функционирования низкоорбитальных спутников Земли за счёт включения в состав бортовых систем корректирующей ЭРДУ малой тяги;

- проведены проектные исследования и разработана методика выбора оптимальных проектно-баллистических параметров, траекторий и законов управления как для пилотируемых экспедиций Земля-Марс-Земля, так и для автоматических межпланетных КА.

Библиографический список

1. Салмин, В. В. Приближенные методы расчета оптимальных перелетов космических аппаратов с двигателями малой тяги. Часть I [Текст] / В. В. Салмин, В. В. Васильев, С. А. Ишков, В. А. Романенко, О. Л. Старинова, В. О. Соколов, В. В. Юрин // Вестник СГАУ № 1 (11). - 2007. – С. 37-52.

2. Салмин, В. В. Методы решения вариационных задач механики космического полета с малой тягой. Монография [Текст] / В. В. Салмин, С. А. Ишков, О. Л. Старинова. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра Рос. акад. наук, 2006. – 164 с.

Таблица 2.4. Результаты поэтапной проектно-баллистической оптимизации пилотируемой экспедиции Земля-Марс-Земля с двигателем МТ

Использованная модель	Оптимальные даты		τ , безр	T_{Σ} , сут	Масса КА, тонн			Оптимальные параметры	
	старта	финиша			старт	финиш	расход	P , Н	c , км/с
Планетоцентрическое и гелиоцентрическое движение рассчитывалось по приближенным зависимостям	6.7.2017	5.8.2019	0,456	770	371,0	130,0	181,0	350,2	72
Модель А	8.7.2017	7.8.2019	0,456	770	361,8	129,9	171,9	350,1	70
Модель Б (без оптимизации точек стыковки плането- и гелиоцентрических участков)	8.7.2017	7.8.2019	0,454	770	316,8	129,9	126,9	350,0	70
Модель Б (оптимальная стыковка плането- и гелиоцентрических участков)	9.7.2017	8.8.2019	0,456	770	309,7	129,9	119,8	350,0	70
Модель В (имитационное моделирование)	9.7.2017	10.8.2019	-	772	309,7	129,9	119,8	350,0	70

References

1. Salmin, V. V. Approximate methods of calculating optimal flights of space vehicles with low-thrust engines. Part I. / V. V. Salmin, V. V. Vassiliev, S. A. Ishkov, V. A. Romanenko, O. L. Starinova, V. O. Sokolov, V. V. Yurin // SSAU Vestnik (Bulletin) No. 1 (11). – 2007. – pp. 37-52.
2. Salmin, V. V. Methods of solving variational problems of mechanics of low-thrust space flight. Monograph. / V. V. Salmin, S. A. Ishkov, O. L. Starinova. – Samara: Publishing house of Samara scientific centre of Russian Academy of Science, 2006. – 164 pp.

**APPROXIMATE METHODS OF CALCULATING OPTIMAL FLIGHTS
OF SPACE VEHICLES WITH LOW-THRUST ENGINES. PART II.**

© 2008 V. V. Salmin, V. V. Vassiliev, S. A. Ishkov, V. A. Romanenko,
V. O. Sokolov, O. L. Starinova, V. V. Yurin

Samara State Aerospace University

The second part of the article presents the results of solving some applied problems of flights of space vehicles with low-thrust engines.

Space vehicle, low thrust, optimal control, approximate methods, geocentric manoeuvres, relative motion, interplanetary flights.

Информация об авторах

Салмин Вадим Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов СГАУ.

Ишков Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры динамики полета и систем управления СГАУ.

Васильев Валерий Валерианович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аэрогидродинамики СГАУ.

Романенко Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте СГАУ.

Соколов Владимир Октябrevич, кандидат технических наук, доцент, доцент СГАУ.

Старинова Ольга Леонардовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов СГАУ.

Юрин Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент СГАУ.

Salmin, Vadim Viktorovitch, Doctor of Technical Sciences, professor, head of aircraft construction department, SSAU.

Ishkov, Sergey Alexeyevitch, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the department of flight dynamics and control systems, SSAU.

Vassiliev, Valery Valerianovitch, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of aerohydrodynamics department, SSAU.

Romanenko, Vladimir Alexandrovitch, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the department of transportation organization and management, SSAU.

Sokolov, Vladimir Oktyabrevitch, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of SSAU.

Starinova, Olga Leonardovna, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of aircraft construction department, SSAU.

Yurin, Vladimir Viktorovitch, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of SSAU.

УДК 629.785

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПТИМИЗАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МИССИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МАЛОЙ ТЯГОЙ

© 2008 О.Л. Старинова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается информационно-вычислительная система интеллектуализированной поддержки оптимизации межпланетных миссий с малой тягой. Под оптимизацией миссии подразумевается совместная оптимизация законов управления, соответствующих им траекторий движения и проектных параметров космических аппаратов. Система основывается на использовании современных методов динамической обработки данных, полученных на последовательности уточняющихся моделей миссии.

Космический аппарат, малая тяга, оптимальное управление, математические модели движения.

Использование перспективных двигательных установок, основанных на новых физических принципах, позволяет повысить эффективность созданной и разрабатываемой космической техники. К таким установкам относятся электроракетные двигатели (ЭРД), работающие на принципе ускорения рабочего тела (РТ) в электростатических или электромагнитных полях. ЭРД придают космическим аппаратам (КА) ускорение, существенно меньше гравитационного на поверхности Земли, и поэтому их традиционно называют двигателями малой тяги (МТ). Использование ЭРД позволяет значительно сократить затраты на осуществление межпланетных миссий, однако существенные трудности при анализе и оптимизации движения с МТ сдерживает создание таких КА.

Для преодоления указанных выше трудностей предлагается подход, связанный с использованием информационно-вычислительной системы (ИВС) интеллектуализированной поддержки оптимизации миссий. Эта система методически основывается на последовательности усложняющихся моделей, описывающих проектный облик, функционирование и движение КА с различными степенями точности. ИВС позволяет выполнять оптимизацию межпланетных миссий в рамках выбранных моделей, сохранять и находить полученные решения в базе данных (БД), аппроксимировать результаты приближённо-аналитическими зависимостями. Данный подход в сочетании с классическими методами теории оптимального управления,

нелинейного программирования и методов динамической обработки информации позволяет автоматизировать оптимизацию межпланетных миссий КА с МТ.

Задача комплексной проектно-баллистической оптимизации миссии формулируется следующим образом. Вводятся:

- $\bar{x}(t) \hat{I} X$ - вектор фазовых координат КА, подчиняющийся граничным условиям, определяемым целью перелёта и возможными ограничениями, где X - множество допустимых фазовых координат;

- $\bar{u}(t) \hat{I} U$ - вектор функций управления, на компоненты которого наложены ограничения, связанные с конструктивными особенностями КА и ДУ, где U - множество допустимых управлений;

- $\bar{p} \hat{I} P$ - вектор оптимизируемых проектных параметров КА, ограниченный множеством допустимых проектных параметров P ;

- $\bar{b} \in B$ - вектор баллистических параметров, зависящий от цели миссии.

В зависимости от выбранной модели движения вектор фазовых координат КА содержит $\bar{x}(t) = (M, r, \varphi, V_r, V_\varphi, i, \Omega)^T$, где M - текущая масса КА; r - расстояние от КА до притягивающего центра в выбранной системе отсчёта; φ - текущая угловая дальность; V_r, V_φ - компоненты вектора скорости; i, Ω - наклонение и долгота восходящего узла.

Вектор проектных параметров КА в зависимости от выбранной проектной модели может содержать компоненты $\bar{p} = (a_\sigma, c, \alpha_i,$

$\gamma_p, \chi)^T$, где a_0 – номинальное ускорение ДУ; c – скорость истечения рабочего тела; α_i, γ_i – удельные массовые характеристики i -го компонента КА по тяге и мощности; χ – коэффициент изменения тяги ДУ.

Состав вектора функций управления изменяется в зависимости от выбранной модели движения и критерия оптимальности $\bar{u}(t) = (\lambda_1, \lambda_2, \delta)^T$, где λ_1 – угол, определяющий положение тяги в плоскости орбиты; λ_2 – угол, определяющий положение тяги относительно плоскости орбиты; δ – функция включения-выключения ДУ.

Состав вектора параметров баллистической схемы перелёта \bar{b} зависит от цели и баллистической схемы миссии (рис. 1). $\bar{b} = (D_0, T_p, DV_i)^T$, где D_0 – дата старта миссии; T_i – длительности участков перелёта, определяющие положение планет назначения, финиша и промежуточных гравитационных манёвров; DV_i – гиперболические избытки скорости на границах участков движения, приращения скоростей в моменты гравитационных манёвров или включений двигателей большой тяги.

В качестве критерия оптимальности миссий КА с МТ используется минимальная стартовая масса M_0 при заданных массе полезного груза $M_{пг}$ и общей продолжительности перелёта T . В этом случае целью про-

ектно-баллистической оптимизации миссии является определение векторов $\bar{p} \in P, \bar{u}(t) \in U$ и $\bar{b} \in B$, доставляющих минимум стартовой массы M_0 и обеспечивающих выполнение требуемых граничных условий миссии $\bar{x} \in X$ при заданных $M_{пг}$ и T :

$$M_0 = \min_{\bar{u}(t) \in U, \bar{p} \in P, \bar{b} \in B} M_0(M_{пг} = \text{fixe}, T = \text{fixe}, \bar{x} \in X, \bar{u}(t), \bar{p}, \bar{b}). \quad (1)$$

Наиболее существенным упрощением задачи (1) является её разделение на проектно-баллистическую часть. Под баллистической оптимизацией миссии понимается определение оптимальных векторов управления $\bar{u}_{opt}(t) \in U$ и параметров баллистической схемы миссии $\bar{b}_{opt} \in B$, доставляющих экстремум критерию оптимальности при фиксированных проектных параметрах \bar{p} . Проектная оптимизация миссии заключается в выборе оптимальных проектных параметров КА $\bar{p} \in P$, доставляющих экстремум критерию оптимальности. При этом используются зависимости $\bar{u}_{opt}(t, \bar{p}), \bar{b}_{opt}(\bar{p})$, полученные в ходе баллистической оптимизации.

В общем случае решение задачи (1) не обладает инвариантностью по отношению к проектным параметрам КА, и поэтому стро-

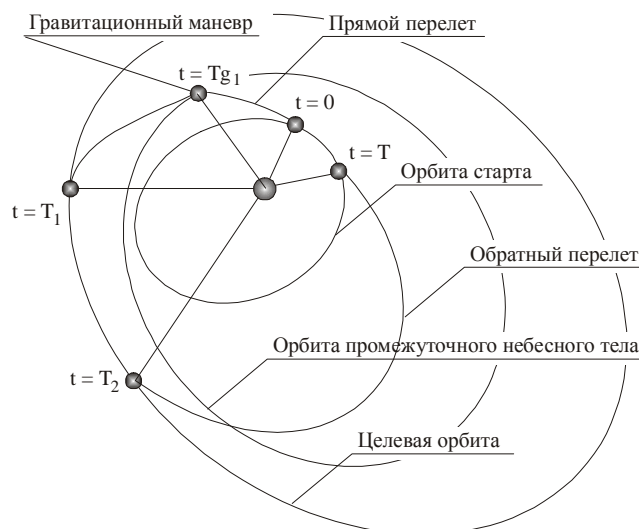


Рис. 1. К определению вектора параметров баллистической схемы миссии

гое разделение на проектную и баллистическую части невозможно. Для КА с ЭРД мощность энергоустановки и тяга ДУ зависят от фазовых координат (расстояния КА от Солнца, угла поворота солнечных батарей, длительности работы ядерного реактора и др.). В качестве промежуточного критерия оптимальности удобно использовать приведённое

$$\text{время работы двигателей } T_m^*(T) = \int_{t_0}^T c(\bar{x}) dt,$$

где функция $c(\bar{x}) = b(\bar{x})/b_0$ определяет зависимость секундного расхода РТ $b(\bar{x})$ от фазовых координат, d - функция включения-выключения двигателей. Вид функции $c(\bar{x})$ зависит от используемых моделей функционирования энергодвигательной установки [1]. Для КА с солнечной энергоустановкой обычно считают $c(\bar{x}) = r^{-k}$, $k \approx 1,7-2$, а для ядерной энергоустановки можно считать $c(\bar{x}) \equiv 1$. Этот промежуточный критерий позволяет описать потребную массу РТ $M_{РТ}$ зависимостью

$$M_{РТ}(T) = \int_{t_0}^T b(\bar{x}) dt = \frac{P_0}{c_0} \int_{t_0}^T c(\bar{x}) dt = \frac{P_0}{c_0} \cdot T_m^*(T). \quad (2)$$

Традиционно проектная модель КА с ЭРД имеет вид уравнения баланса масс [2]:

$$M_0 = M_{ИГ} + M_{Э} + M_{Д} + \frac{P_0}{c_0} \cdot T_m^*(T)(1 + k_{СПХ}) + M_{К}, \quad (3)$$

где $M_{Э}$ – масса энергоустановки, состоящая из источника и преобразователя энергии; $M_{Д}$ – масса ДУ, включающая маршевые и управляющие двигатели вместе с исполнительными органами; $M_{СПХ}$ – масса системы подачи и хранения рабочего тела ($k_{СПХ} = M_{СПХ}/M_{РТ}$); $M_{К}$ – масса корпуса и конструкций КА.

Отсюда следует, что минимум стартовой массы КА (для фиксированных P_0 и c_0) соответствует минимуму приведённого мо-

торного времени $T_m^*(T)$. Таким образом, баллистическая часть задачи оптимизации (1) сводится к определению зависимостей $\bar{u}_{opt}(t, \bar{p})$ и $\bar{b}_{opt}(\bar{p})$, доставляющих минимум $T_m^*(T)$:

$$T_m^*(T, \bar{p}) = \min_{\bar{u}(t) \in U, \bar{b} \in B} T_m^*(T = fixe, \bar{x} \in X, \bar{u}(t), \bar{b}, \bar{p}),$$

$$\bar{u}_{opt}(t) = \arg \min_{\bar{u} \in U, \bar{b} \in B} T_m^*(T = fixe, \bar{x}(t, \bar{u}, \bar{b}) \in X, \bar{u}(t), \bar{b}),$$

$$\bar{b}_{opt} = \arg \min_{\bar{u}(t) \in U, \bar{b} \in B} T_m^*(T = fixe, \bar{x}(t, \bar{u}, \bar{b}) \in X, \bar{u}(t), \bar{b}), \quad (4)$$

а проектная часть – к определению оптимального вектора \bar{p}_{opt} , обеспечивающего минимум стартовой массы КА:

$$M_0 = \min_{\bar{p} \in P} M_0(M_{ИГ} = fixe, T_m^*(T, \bar{p}), \bar{x}_{opt}(t, \bar{p}) \in X, \bar{u}_{opt}(t, \bar{p}), \bar{p}, \bar{b}_{opt}(\bar{p})). \quad (5)$$

Задача оптимизации миссии может решаться с различной степенью точности в зависимости от выбранных моделей движения и проектного облика КА. Описываемый подход предполагает использовать последовательность уточняющихся моделей проектного облика и управляемого движения КА [3]. Различные модели, описывающие движение КА на плането- и гелиоцентрических участках траектории, будем обозначать $M_{i,j}$. Первый индекс определяет номер используемой модели планетоцентрического движения, второй – номер модели гелиоцентрического движения. Модель, являющуюся результатом аппроксимации решений, полученных на модели $M_{i,j}$, обозначим $A_{i,j}$ (рис. 2).

Отдельно выделена группа наиболее простых моделей, допускающих аналитические решения (описываются отдельные участки движения КА под действием простых, заранее известных законов управления). Уточнение описания околопланетного движения достигается за счёт учёта нецентральной гравитационного поля притягивающего тела, влияния атмосферы, притяжения

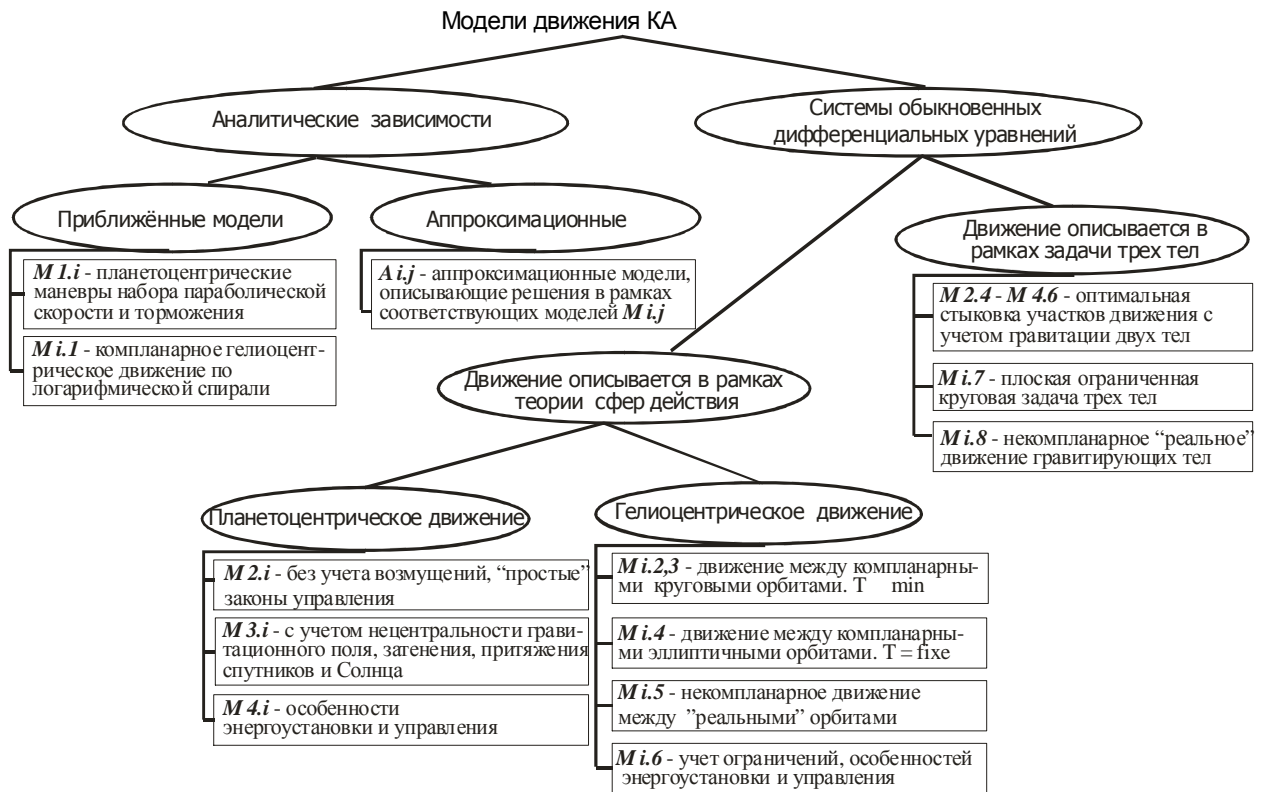


Рис 2. Структурная схема моделей движения КА, использующихся для решения баллистической части задачи оптимизации межпланетных миссий

спутников планеты и Солнца, светотеневой обстановки на орбите, способов управления и других факторов. Гелиоцентрическое движение КА уточняется за счёт учёта эллиптичности и некомпланарности орбит планет, влияния солнечной радиации и температуры на эффективность работы энергоустановки, ограничений на фазовые координаты и законы управления ДУ.

Одновременно с уточнением модели движения требуется уточнять математическое описание проектного облика КА. Наиболее простыми и часто используемыми зависимостями массы отдельных компонентов КА от проектных параметров являются линейные зависимости масс от номинальной мощности энергоустановки N_0 и тяги двигателей на орбите Земли P_0 :

$$M_{\text{Э}} = a_{\text{Э}} \cdot N_0, M_{\text{Д}} = g_{\text{Д}} \cdot P_0,$$

$$M_{\text{К}} = a_{\text{К}} \cdot N_0 + g_{\text{К}} \cdot P_0, N_0 = \frac{P_0 c_0}{2h_{\text{T}} h_{\text{ПЭ}}}, \quad (6)$$

где $a_{\text{Э}}, a_{\text{К}}, g_{\text{Д}}, g_{\text{К}}$ - соответствующие удельные массовые характеристики; $h_{\text{T}}, h_{\text{ПЭ}}$ - тяговый КПД и КПД преобразователя энергии. Учитывая (6), получим новый вид уравнения баланса масс (3):

$$M_0 = M_{\text{П}} + (a_{\text{Э}} + a_{\text{К}}) \cdot \frac{P_0 c_0}{2h_{\text{T}} h_{\text{ПЭ}}} + (g_{\text{Д}} + g_{\text{К}}) \cdot P_0 + \frac{P_0}{c_0} \cdot T_m^*(T, \bar{p}, \bar{b})(1 + k_{\text{СПХ}}). \quad (7)$$

Процесс оптимизации миссии связан с многократным решением вариационных задач об оптимальных гелиоцентрических перелётах (4) при различных значениях векторов проектных и баллистических параметров. Решение этих задач требует эвристических подходов, высокой квалификации исполнителя и не позволяет осуществить автоматизацию процесса оптимизации.

Разработанная **информационно-вычислительная система** интеллектуализирован-

ной поддержки оптимизации состоит из двух взаимосвязанных частей, предназначенных для решения проектной и баллистической задач оптимизации межпланетных миссий с МТ. В основании ИВС лежит база данных (БД) баллистических решений задачи оптимизации миссии.

Работа ИВС начинается с описания цели миссии и ограничений на проектно-баллистическую схему перелёта, определяющих множество допустимых фазовых координат $X = \{\bar{x}(t_0), \bar{x}(t_i), \dots, \bar{x}(T)\}$, задания критерия оптимальности и начального приближения для векторов проектных и баллистических параметров $\bar{z}_{TP} = (\bar{b}, \bar{p}, X)^T$.

Включённые в ИВС процедуры поиска позволяют в рамках выбранной n -ой модели найти в БД решение, наиболее близкое к требуемому \bar{z}_{TP}^n . Если такое решение для n -ой модели не найдено, то система понижает уровень сложности и поиск повторяется. При понижении сложности до первого уровня решение задачи проводится по приближённым аналитическим зависимостям (модель М 1.1). После получения начального приближения решения осуществляется его уточнение с использованием процедур перемещения в пространстве баллистических и проектных параметров, которые позволяют определить

решение задач оптимизации при незначительном изменении одного или нескольких компонентов \bar{z}^n .

При работе ИВС база данных автоматически расширяется за счёт включения в неё всех решений, полученных в процессе «перемещений» в пространстве баллистических и проектных параметров и увеличении уровня сложности моделей. При достаточном количестве решений, полученных для данной модели движения, возможно использование режима обработки данных – получения или уточнения аппроксимационных зависимостей, связывающих критерий оптимальности, начальные приближения для решения задач управления и вектор проектно-баллистических параметров. В процессе предусмотренных коррекций БД происходит удаление лишних, слишком близких друг к другу решений.

На рис. 3 показана упрощённая схема оптимизации межпланетной миссии ИВС.

Рекомендации по выбору оптимальных проектных параметров КА, управления и баллистической схемы миссии выдаются на основе решения задач математического программирования.

Методы, используемые ИВС для поиска оптимального управления. В рамках выбранной модели оптимальное управление определяется или (в соответствии с принци-



Рис. 3. Упрощённая схема оптимизации межпланетной миссии

пом максимума Понтрягина) начальными значениями сопряжённых переменных, или некоторыми другими параметрами управления. Вектор подбираемых параметров управления для n -ой модели движения обозначается $\bar{y}(\bar{z}^n)$.

В соответствии с принципом максимума оптимальное управляемое гелиоцентрическое движение на одном участке описывается сопряжённой системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_{xi}(t, \bar{x}, \bar{u}), \quad \frac{dy_i}{dt} = f_{yi}(t, \bar{x}, \bar{u}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Фазовые координаты КА в начале участка являются определёнными, а начальные условия сопряжённых множителей – неизвестными:

$$t = t_0, \quad \bar{x}(t_0) = x_0, \quad \bar{y}(t_0) - \text{не определено.} \quad (9)$$

В конце участка требуется выполнение условий, определяемых целью перелёта:

$$t = t_K, \quad j_j(t_K, \bar{x}(t_K), \bar{y}(t_K)) = 0. \quad (10)$$

Значения переменных $\bar{x}(t_K)$, $\bar{y}(t_K)$ можно рассматривать как функции заданных начальных значений сопряжённых переменных $\bar{y}(t_0)$. Решение краевой задачи (8 - 10) сводится к отысканию корней системы уравнений:

$$j_j(t_K, \bar{y}(t_0)) = 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (11)$$

Вид функции невязок зависит от цели миссии и выбранной модели движения. Например, он может определяться граничными условиями или условиями трансверсальности. В любом случае значения функции невязок (11) определяются в результате моделирования движения КА при заданных начальных условиях и управлении. Функции невязок системы (11) очень чувствительны к начальным значениям подбираемых параметров $\bar{y}(t_0)$ и имеют многоэкстремальный, «овражистый» характер. Это их свойство обуславливает плохую сходимость задач оптимизации и значительные вычислительные труд-

ности для их решения. В работе для решения (11) предлагается модифицированный метод Ньютона с автоматической оценкой сходимости и изменением шага вычисления производных и ограничений на приращения.

Для оптимизации миссий требуется многократное решение задачи (11) при различных значениях вектора проектно-баллистических параметров $\bar{z} = (\bar{b}, \bar{p}, X)^T$. Для перемещений в пространстве этих переменных в ИВС использовался известный метод продолжения по параметру [4], который совместно с использованием последовательности усложняющихся моделей позволил автоматизировать процесс оптимизации межпланетных миссий с МТ.

Процедуры динамической обработки базы данных. В процессе работы ИВС база данных заполняется решениями баллистической части задачи оптимизации миссии. Если полученные решения описывать приближёнными аппроксимационными зависимостями, то их можно использовать в качестве начального приближения для решения задач с другими требуемыми значениями проектно-баллистических параметров и для проектной оптимизации системы без решения множества краевых задач. В ИВС эта идея реализуется в виде процедур динамической обработки полученных данных.

Решения баллистической части задачи оптимизации миссии в рамках n -ой модели сохраняются в базе данных в виде набора

$$\bar{y}(\bar{z}_i) = (T_m^*(\bar{z}_i), \bar{y}(\bar{z}_i), \bar{b}(\bar{z}_i))^T, \quad (12)$$

содержащего значение критерия оптимальности для заданного вектора проектно-баллистических параметров $T_m^*(\bar{z}^n)$; оптимальное управление, описываемое вектором подбираемых параметров $\bar{y}(\bar{z}^n)$, и баллистические параметры схемы перелёта $\bar{b}(\bar{z}^n)$.

Поскольку «удачные» решения в виде наборов (12) сохраняются в базе данных, то чем дольше пользователь работает над оптимизацией данной миссии, тем больше таких решений накапливается. По запросу пользователя разработанная ИВС может получить или уточнить приближённые аппроксимаци-

онные зависимости, описывающие полученные численно результаты $y_j(\bar{z}_i)$.

Для построения аппроксимационных зависимостей $f_j(\bar{z})$ использовался метод наименьших квадратов с традиционным квадратичным критерием выравнивания. В ИВС в качестве аппроксимирующего семейства функций $f_j(\bar{z})$ избираются полиномы четвёртой степени, содержащие m коэффициентов $\bar{a}_j = (a_{j1}, \dots, a_{jm})^T$ и входных параметров $\bar{u} = (u_1, \dots, u_m)^T$, представляющих собой комбинации четвёртого порядка составляющих вектора проектно-баллистических параметров:

$$f_j(\bar{z}) = f_j(\bar{u}) = \bar{a}_j \cdot \bar{u} = \sum_{i=1}^m a_{ji} u_i. \quad (13)$$

Неизвестные векторные параметры \bar{a}_j^N в (13), полученные по N решениям, определяются в соответствии с теорией регрессионного анализа зависимостями

$$\bar{a}_j^N = P_N \cdot \sum_{k=1}^N q_k y_j(\bar{u}_k) \bar{u}_k, P_N^{-1} = \sum_{k=1}^N q_k (\bar{u}_k \bar{u}_k^T). \quad (14)$$

При проведении регрессии по формулам (13) требуется обращение матрицы P_N^{-1} , размерность которой увеличивается с увеличением числа обрабатываемых решений, и размерности векторов входных переменных. Это требует больших вычислительных ресурсов и существенно замедляет процесс обработки данных. В разработанной ИВС зависимости (14) используются только на начальных этапах работы с системой, когда общее число полученных решений невелико. В дальнейшем оценки неизвестных параметров регрессии уточняются с использованием последовательного регрессионного метода [5], суть которого заключается в последовательном уточнении коэффициентов регрессионной модели с учётом новых данных.

При получении нового $N+1$ -го решения вектор неизвестных параметров уточняется по формуле

$$\bar{a}_j^{N+1} = \bar{a}_j^N + P_{N+1} q_{N+1} \bar{u}_{N+1} (y_j(\bar{z}_{N+1}) - \bar{a}_j^N (\bar{u}_{N+1})^T), \quad (15)$$

где

$$P_{N+1} = P_N - P_N H_{N+1} (1 + H_{N+1}^T P_N H_{N+1})^{-1} H_{N+1}^T P_N, \\ H_{N+1} = \sqrt{q_{N+1}} \bar{u}_{N+1}.$$

Вычисления в соответствии с (15) не требуют обращения матриц, т.к. выражение $(1 + H_{N+1}^T P_N H_{N+1})$ является скаляром. При уточнении неизвестных параметров по (14) появляется возможность хранить в БД не полученные решения, а только результаты их обработки, т.е. \bar{a}_j^N и P_N , что позволяет уменьшить объём требуемой памяти и повысить эффективность работы ИВС.

В процессе численной обработки результатов решений баллистической части задачи оптимизации были получены приближённые аппроксимационные зависимости, описывающие миссии КА с солнечной энергодвигательной установкой малой тяги в рамках различных моделей движения.

Задача об оптимальном по быстродействию перелёте между круговыми компланарными орбитами без учёта расхода рабочего тела описывается в ИВС моделью М i.2 и сводится к двухточечной краевой задаче, в которой управление определяется двумя параметрами: I_0 и B . Цель перелёта задаётся безразмерным радиусом конечной орбиты r_k . Вектор проектных параметров КА содержит один компонент – уровень номинального ускорения a_0 . Баллистическими параметрами миссии являются минимальная длительность T и угловая дальность перелёта ϕ . Таким образом, результаты решения описываются двухпараметрическими зависимостями $T(r_k, a_0)$, $j(r_k, a_0)$, $I_0(r_k, a_0)$, $B(r_k, a_0)$, полученными численно для диапазонов радиусов конечных орбит $r_k \in [0.1; 1) \cup (1; 5]$ и номинального ускорения $a_0 \in [0.001; 5]$ мм/с². С использованием процедуры обработки БД построены соответствующие аппроксимационные зависимости. Например, на рис. 4 показана зависимость минимальной длительности перелёта в двумерном пространстве (r_k, a_0) .

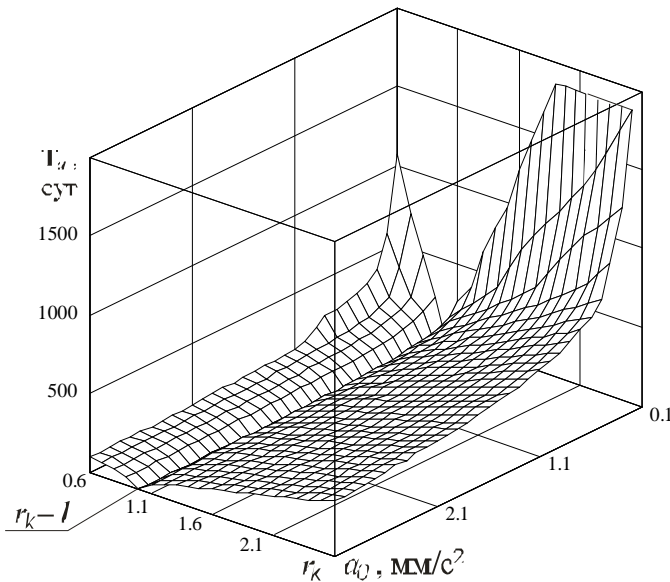


Рис. 4. Аппроксимационная зависимость $T_a(r_k, a_0)$, полученная по решениям в рамках модели М i.2

Оптимальные по быстродействию перелёты между круговыми орбитами с учётом расхода рабочего тела и изменения тяги двигателей с удалением от Солнца описываются в ИВС моделью М i.3. В этой модели управление определяется тремя параметрами: I_0 , B и P_m . Вектор проектных параметров расширяется за счёт включения скорости истечения рабочего тела c . Баллистическими параметрами решения являются минимальная длительность T , угловая дальность перелёта φ и относительный расход рабочего тела

$$m = \frac{M_{PT}}{M_0}. \text{ Таким образом, результаты реше-}$$

ния описываются шестью двухпараметрическими зависимостями: $T(a_0, c)$, $j(a_0, c)$, $m(a_0, c)$, $I_0(a_0, c)$, $B(a_0, c)$, $P_m(a_0, c)$, полученными численно для диапазонов проектных параметров $a_0 \in [0, 1; 3, 1]$ мм/с², $c \in [25; 110]$ км/с и различных значений r_k . Применение к ним описанной методики позволило получить необходимые аппроксимационные зависимости. Например, для перелёта Земля – Марс ($r_k = 1,524$) эти зависимости имеют вид:

$$T_a(a_0, c) = 0.001a_0^3c + 6.38a_0^4 - 59.097a_0^3 + 211.96a_0^2 - 0.0199a_0^2c + 6.21 \cdot 10^{-5}a_0^2c^2 - 383.43a_0 + 0.152a_0c - 0.001a_0c^2 + 2.5210^{-6}a_0c^3 - 394.04 + 1.439c - 0.02c^2 + 1.347 \cdot 10^{-4}c^3 - 0.35 \cdot 10^{-6}c^4;$$

$$j_a(a_0, c) = 5.52 \cdot 10^{-4}a_0^3c + 4.49a_0^4 - 41.547a_0^3 + 148.662a_0^2 - 0.012a_0^2c + 4.55 \cdot 10^{-5}a_0^2c^2 - 266.851a_0 + 0.073a_0c - 4.45 \cdot 10^{-4}a_0c^2 + 0.81 \cdot 10^{-6}a_0c^3 + 280.29 + 0.9c - 0.013c^2 + 0.894 \cdot 10^{-4}c^3 - 0.24 \cdot 10^{-6}c^4;$$

$$m_a(a_0, c) = -0.5 \cdot 10^{-4}a_0^3c - 0.001a_0^4 + 0.02a_0^3 - 0.1a_0^2 + 7.5 \cdot 10^{-4}a_0^2c - 2.1 \cdot 10^{-6}a_0^2c^2 + 0.45a_0 - 0.01a_0c + 0.37 \cdot 10^{-4}a_0c^2 - 8.796 \cdot 10^{-8}a_0c^3 + 0.46 - 0.02c + 2.5 \cdot 10^{-4}c^2 - 1.78 \cdot 10^{-6}c^3 + 4.784 \cdot 10^{-9}c^4;$$

$$B_a(a_0, c) = -1.634 \cdot 10^{-4}a_0^3c - 0.0013a_0^4 + 0.0092a_0^3 + 0.0532a_0^2 - 0.00105a_0^2c + 6.182 \cdot 10^{-6}a_0^2c^2 + 0.209a_0 - 0.0135a_0c + 0.00016a_0c^2 - 6.268 \cdot 10^{-7}a_0c^3 + 1.918 - 0.0198c + 0.00043c^2 - 4.09 \cdot 10^{-6}c^3 + 1.403 \cdot 10^{-8}c^4;$$

$$I_{0a}(a_0, c) = 4.468 \cdot 10^{-4}a_0^3c + 0.633a_0^4 - 6.109a_0^3 + 23.51a_0^2 - 0.005a_0^2c + 0.142 \cdot 10^{-6}a_0^2c^2 - 45.99a_0 - 0.067a_0c + 7.6 \cdot 10^{-4}a_0c^2 - 2.8 \cdot 10^{-6}a_0c^3 + 96.8 - 0.15c + 0.003 \cdot 10^{-4}c^2 - 0.24 \cdot 10^{-6}c^3 + 7.554 \cdot 10^{-8}c^4;$$

$$P_{ma}(a_0, c) = -4.68 \cdot 10^{-4}a^3c - 0.002a^4 + 0.026a^3 + 0.022a^2 - 0.003a^2c + 0.17 \cdot 10^{-4}a^2c^2 + 1.079a - 0.024ac + 2.98 \cdot 10^{-4}ac^2 - 1.25 \cdot 10^{-6}ac^3 + 0.58 - 0.029c + 6.9 \cdot 10^{-4}c^2 - 6.89 \cdot 10^{-6}c^3 + 2.462 \cdot 10^{-8}c^4.$$

(16)

Для построения приближённых зависимостей, описывающих межпланетные перелёты с заданной датой старта, в ИВС используются результаты решения вариационных задач в рамках модели М i.3 при фиксированной угловой дальности перелёта. Если угловая дальность и длительность перелёта фиксированы одновременно, то однозначно определяется угловое расстояние Dj между планетами старта и назначения, при котором КА достигнет планеты назначения:

$$Dj = j - T \cdot w_k, \quad (17)$$

где w_k - средняя угловая скорость планеты назначения. Зависимости минимальной длительности перелётов $T_{inf}(Dj)$ и относительного расхода рабочего тела $m_{sup}(Dj)$ имеют вид кривой с одним минимумом и горизонтальной асимптотой (локон Аньези):

$$f(Dj) = a_1 + a_2 \frac{|Dj - a_3|^{a_4}}{a_5 + |Dj - a_3|^{a_4}}, \quad (18)$$

где a_1 - минимальные значения аппроксимируемых функций $T(a_0, c)$, $j(a_0, c)$, $m(a_0, c)$, найденные по формулам (16); $a_3 = Dj_0$ равен оптимальному угловому положению между планетами старта и финиша и рассчитывается по (17). Коэффициент a_2 определяется по

методу наименьших квадратов. Для проектных параметров $a_0 \in [0,1; 5]$ мм/с², $c \in [20, 150]$ км/с получены требуемые аппроксимационные зависимости [1]. Например, на рис. 5 показана аппроксимационная зависимость длительности перелёта Земля-Мартс от стартового положения планет.

Для приближённого описания оптимальных по расходу РТ гелиоцентрических перелётов КА с солнечной ЭДУ в рамках ИВС используется модель М i.4. Относительный расход РТ m на перелет заданной длительности T приближённо описывается формулой

$$m_a(T, Dj, a_0, c) = m_{inf a} + \frac{(m_{sup a} - m_{inf a})}{(T - T_{inf a}) \cdot (m_{sup a} - m_{inf a}) + a_1}, \quad (19)$$

где $m_{inf a}$ - наименьший расход РТ, зависящий от стартового положения планет, который рассчитывается как расход РТ, необходимый на двухимпульсный гелиоцентрический перелёт по эллипсу Гомана; $m_{sup a}$ - расход РТ на оптимальный по быстродействию перелёт, полученный по (16). На рис. 6 показаны диаграммы «расход рабочего тела - длительность перелёта» для различных стартовых положений планет, построенные по аппроксимационным формулам для миссии Земля-Мартс.

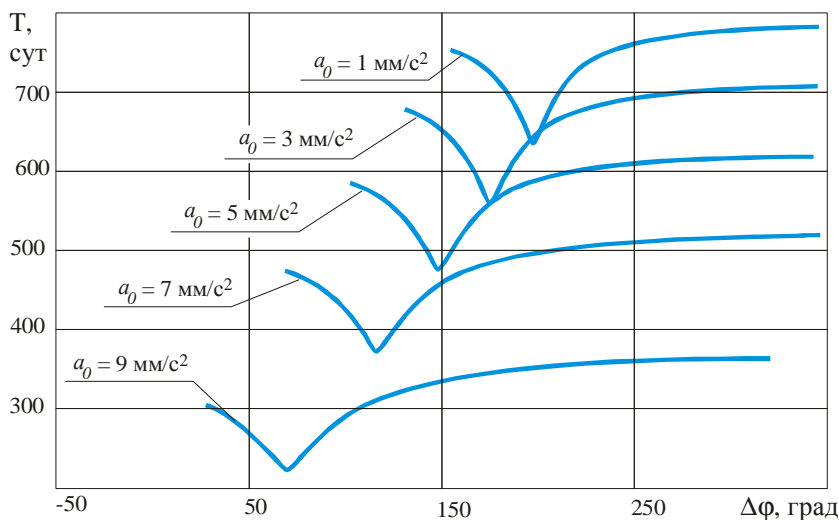


Рис. 5. Зависимость $T_{inf a}(Dj, a_0, c)$ для миссии Земля-Мартс

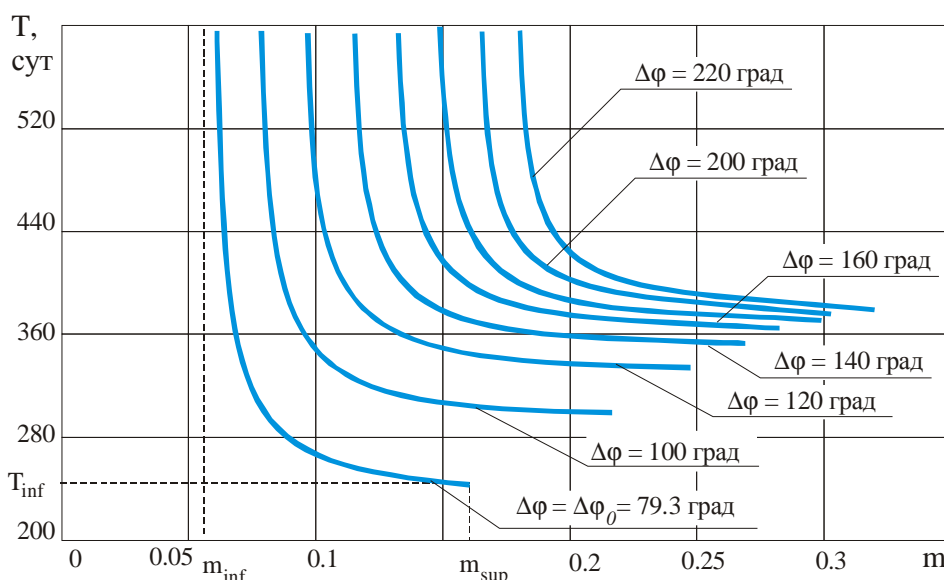


Рис. 6. Диаграммы «длительность перелёта - расход рабочего тела» для миссии Земля-Марс

Результаты оптимизации миссии Земля-Марс. Вектор проектно-баллистических параметров миссии содержит номинальное ускорение от тяги двигателей, скорость истечения рабочего тела и дату старта перелёта D_0 . Алгоритм проектно-баллистической оптимизации миссии в этом случае может быть описан итерационной процедурой, которая основана на последовательном расчёте плането- и гелиоцентрических участков траектории и получении зависимости критерия оптимальности M_0 от вектора проектно-баллистических параметров. Решение задачи оптимизации (1) проводится с использованием известных методов математического программирования.

В таблице 1 представлены результаты оптимизации доставки полезного груза массой 2000 кг на орбиту спутника Марса для различной длительности миссии. Расчёты проводились при следующих значениях удельных проектных параметров, входящих в массовую модель КА (7): $g_{СПХ} = 0,01$, $g_K = 0,75$, $g_D = 70$, $a_Э = 6$, $a_K = 9,5$, $h_T \cdot h_{ПЭ} = 0,75$, запасы рабочего тела на управление составляли 2 % от рабочего тела, необходимого для полёта по программной траектории. Приведённые результаты получены с использованием приближённых аппроксимационных формул и по модели М 3.4

Таблица 1. Оптимальные проектно-баллистические параметры миссии доставки полезной нагрузки массой 2000 кг на ареоцентрическую орбиту в зависимости от длительности экспедиции, рассчитанные по моделям М 1.1 и М 3.4

T, сут	Модель М 1.1 (приближённые зависимости)					Модель М 3.4				
	P_{opt} , Н	c_{opt} , км/с	D_{opt}	M_K , кг	M_0 , кг	P_{opt} , Н	c_{opt} , км/с	D_{opt}	M_K , кг	M_0 , кг
600	1,26	108,97	16.03.2013	2890	3680	1,26	108,96	15.03.2013	2880	3630
550	1,48	99,72	22.03.2013	2950	3870	1,48	99,71	21.03.2013	2940	3780
500	1,77	93,16	30.03.2013	3050	4110	1,77	93,14	29.03.2013	3040	4000
450	2,20	85,74	8.04.2013	3190	4450	2,20	85,73	7.04.2013	3180	4300
400	2,80	71,22	16.04.2013	3290	4990	2,80	71,20	15.04.2013	3280	4740
350	3,99	69,97	25.04.2013	3740	5820	3,99	69,96	24.04.2013	3730	5520

(рис. 2). Сравнение этих результатов показывает, что погрешности расчёта оптимальных проектных и баллистических параметров не превышают 0,1 %, а стартовая масса КА получается несколько завышенной (не более 5 %).

Таким образом, разработанная ИВС показала свою эффективность для оптимизации миссии Земля-Марс и может быть использована для интеллектуальной поддержки процессов анализа и синтеза межпланетных миссий КА с двигателями малой тяги.

Библиографический список

1. Ишков С. А., Милокумова О. Л., Салмин В. В. Оптимизация замкнутых межпланетных перелетов Земля-Марс-Земля с малой тягой // Космические исследования. - 1995. - Т.33, Вып.2. – С. 210-219.

2. Салмин В. В., Ишков С. А., Старинова О. Л. Методы решения вариационных задач механики космического полета с малой тягой. – Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2006.

3. Старинова О. Л. Итерационная оптимизация гелиоцентрического движения космического аппарата с двигателями малой тяги // Сборник трудов 13-го Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд. СГАУ, 2007. – С. 201-212.

4. Старинова О. Л. Оптимизация движения космического аппарата с двигателем малой тяги в системе Земля-Луна // Известия СНЦ РАН, Том 8 №3(17). – Самара, 2006. – С. 824-833.

5. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979.

References

1. S. A. Ishkov, O. L. Milokumova, V. V. Salmin. Optimization of closed-loop low-thrust interplanetary flights Earth-Mars-Earth. // Kosmicheskiye Issledovaniya (Space Investigations.) – 1995. – Vol. 33, issue 2. – pp. 210-219.

2. V. V. Salmin, S. A. Ishkov, O. L. Starinova. Methods of solving variational tasks of low-thrust space flight mechanics. – Samara: Publishing House of Samara Scientific Centre of Russian Academy of Science, 2006.

3. O. L. Starinova. Iteration optimization

of low-thrust engine spacecraft heliocentric motion// Transactions of the 13th All-Russian seminar on aircraft motion control and navigation. - Samara: SSAU Publishing House, 2007. – pp. 201-212.

4. O. L. Starinova. Optimization of low-thrust engine spacecraft motion in the Earth-Moon System.// Izvestiya (News) of Samara Scientific Centre of Russian Academy of Science, Vol. 8 No. 3(17). – Samara, 2006. pp. 824-833.

5. D. Grop. Methods of System identification. – Moscow: Mir, 1979.

SYSTEM OF ARTIFICIAL INTELLECT SUPPORT OF LOW-THRUST SPACECRAFT INTERPLANETARY MISSION OPTIMIZATION

© 2008 O. L. Starinova

Samara State Aerospace University

The paper deals with an information computational system of artificial intellect support of low-thrust interplanetary mission optimization. By mission optimization is meant joint optimization of lows of control as well as spacecraft motion trajectories and design parameters which correspond to them. The system is based on the use of up-to-date dynamic data processing methods obtained on the sequence of refined mission models.

Space craft, low thrust, optimal control, mathematical models of motion.

Информация об авторе

Старинова Ольга Леонардовна, доцент кафедры летательных аппаратов, СГАУ, кандидат технических наук. Область научных интересов: динамика, баллистика и управление движением космических аппаратов с малой тягой, теория оптимального управления.

Starinova, Olga Leonardovna, Associate Professor of Aircraft Construction Department, SSAU, Candidate of Technical Science. Area of research: dynamics, ballistics and control of low-thrust spacecraft motion, theory of optimal control.

УДК 629.7.83

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2008 С. Н. Тиц

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработана вибрационная модель трёхслойной сотовой конструкции с частичным отслоением обшивки. Исследовано влияние величины отслоения на собственную частоту колебания и амплитудно-частотную характеристику. Проведён сравнительный анализ расчётных значений и экспериментально полученных результатов.

Конструкции сотовые, многослойные панели, отслоение, теория колебаний, контроль технического состояния.

1. Анализ проблемы

Самолёты Ту-204, Ил-96 и Ан-124 стали первыми гражданскими воздушными судами (ВС), эксплуатируемыми на регулярных пассажирских линиях с 1995 г., в конструкциях которых нашли широкое (около 30 % по площади фюзеляжа и крыла) применение сотовые конструкции (СК). Анализ статистики отказов и неисправностей данных типов ВС показал, что с увеличением наработки наблюдается рост количества дефектов СК [1].

Несмотря на наличие большого числа современных методов и средств, способных выявить основные дефекты сотовых конструкций, на эксплуатирующих предприятиях сотовые конструкции контролируются преимущественно при помощи метода свободных колебаний (простукивание изделия с регистрацией изменений характера звука на слух). Это связано с тем, что новейшие средства неразрушающего контроля требуют как значительных финансовых затрат, связанных с их приобретением, так и наряду со своей дороговизной значительно увеличивают трудоёмкость выполняемых работ. В связи с этим современные средства используются лишь для уточнения размеров дефектов при ремонте. В результате из-за несовершенства методов и методик контроля технического состояния СК происходит увеличение простоев летательных аппаратов (ЛА) на техническом обслуживании, что значительно снижает эффективность их использования [2]. Поэтому оперативная оценка состояния сотовых конструкций является актуальной задачей.

2. Постановка задачи

Проблема ресурса и надёжной эксплуатации СК неразрывно связана с оперативным выявлением возможных их неисправностей и дефектов, способных привести к разрушению узла, или с эффективными способами диагностирования их технического состояния в процессе эксплуатации.

При этом на основании совокупности информации об объекте ставится задача экстраполировать его поведение в будущем и установить оптимальный момент для проведения очередной проверки технического состояния (ТС) или прекращения эксплуатации данного объекта.

Известно, что традиционные стендовые механические испытания изделия позволяют выяснить лишь факт выхода его параметров за предельный допуск и не дают информации о предстоящем поведении объекта, особенно в условиях динамических воздействий, когда возможны его отказ и даже неожиданное лавинообразное разрушение конструкции.

Периодические обследования изделия и регламентные работы также не позволяют объективно оценить его техническое состояние и принять решение о целесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Плановые отправки изделий на заводы-изготовители для гарантийных ремонтов экономически невыгодны, особенно в условиях их поставки на экспорт.

Суть предлагаемого метода состоит в том, что в процессе жизненного цикла объек-

та через определённые интервалы времени имитируются тестовые динамические воздействия в его контрольных точках, позволяющие по откликам конструкции на эти возбуждения судить о наступлении с течением времени предотказного состояния.

Так у СК при действии на них гармонических возбуждений в некотором частотном диапазоне из-за накопления в процессе эксплуатации повреждений (появления зон «непроклея») происходит изменение жёстких характеристик конструкции. Это приводит к изменению пиковой амплитуды отклика [3]. Кроме того, при этом наблюдается фиксируемый датчиками явный дрейф частот резонансных явлений [4], что в совокупности с применением вейвлет-преобразования для анализа полученного отклика конструкции позволяет сформировать критерий оценки предотказного состояния объекта и создать прототип комплекса для его диагностирования. В качестве базовых амплитуды и частоты резонанса для оценки технического состояния могут быть успешно использованы расчётные значения или значения, замеры и сохраняемые для каждого устройства перед началом его эксплуатации. Расчётные значения могут быть получены как с применением модели, построенной при помощи теории колебаний, так и конечно-элементной модели.

3. Разработка динамической модели повреждённой сотовой конструкции

3.1 Определение жёсткости при изгибе

Рассматривается элемент сотовой конструкции с отслоением обшивки от сотового

заполнителя. Элемент состоит из верхней и нижней обшивки толщиной h_t и h_b , соответственно, сотового заполнителя толщиной h_c и клеевых слоёв между сотовым заполнителем и обшивками (толщина клеевого слоя в расчётах не учитывается) (рис. 1, 2).

Обшивка представляет собой углепластиковую пластину с коэффициентом жёсткости при растяжении-сжатии A_i и при изгибе D_i . Данные упругие свойства конструкции могут быть определены следующим образом:

$$A_i = \sum_{k=1}^{n_i} \bar{Q}_{11}^k (z_k - z_{k-1}),$$

$$D_i = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n_i} \bar{Q}_{11}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3), i = t, b, \tag{1}$$

где z_k и z_{k-1} – координаты k -го элементарного слоя относительно нейтральной оси i -го сегмента конструкции, n_i – номер слоя конструкции. \bar{Q}_{11}^k находится как

$$\bar{Q}_{11}^k = Q_{11}^k \cos^4 q + Q_{22}^k \sin^4 q + 2(Q_{11}^k + 2Q_{66}^k) \cos^2 q \sin^2 q,$$

где q – угол ориентации k -го элементарного слоя относительно системы координат конструкции, Q_{ij}^k – коэффициент жёсткости элементарного слоя в системе координат слоя. Образец сотовой конструкции длиной L и шириной b нагружается силой W (рис. 3).

Два слоя обшивки толщиной h_t разделены слоем сотового заполнителя толщиной h_c . Коэффициент жёсткости при изгибе трёх-

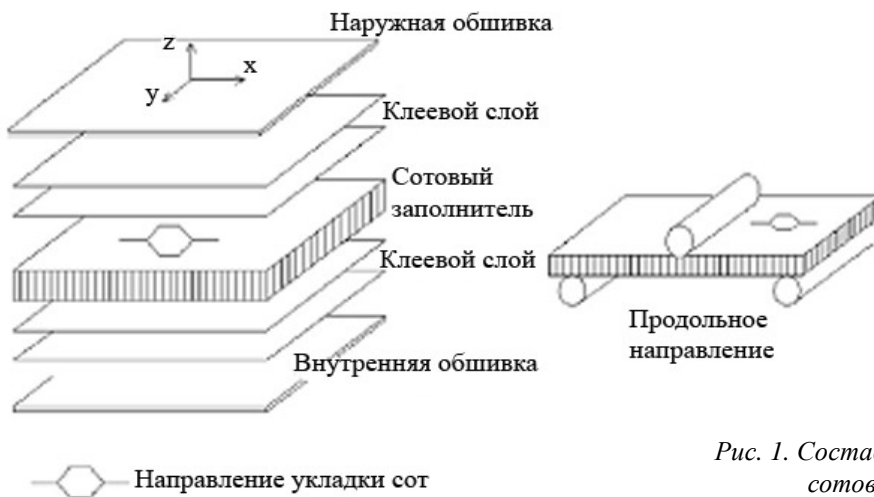


Рис. 1. Состав и направление образца сотовой конструкции

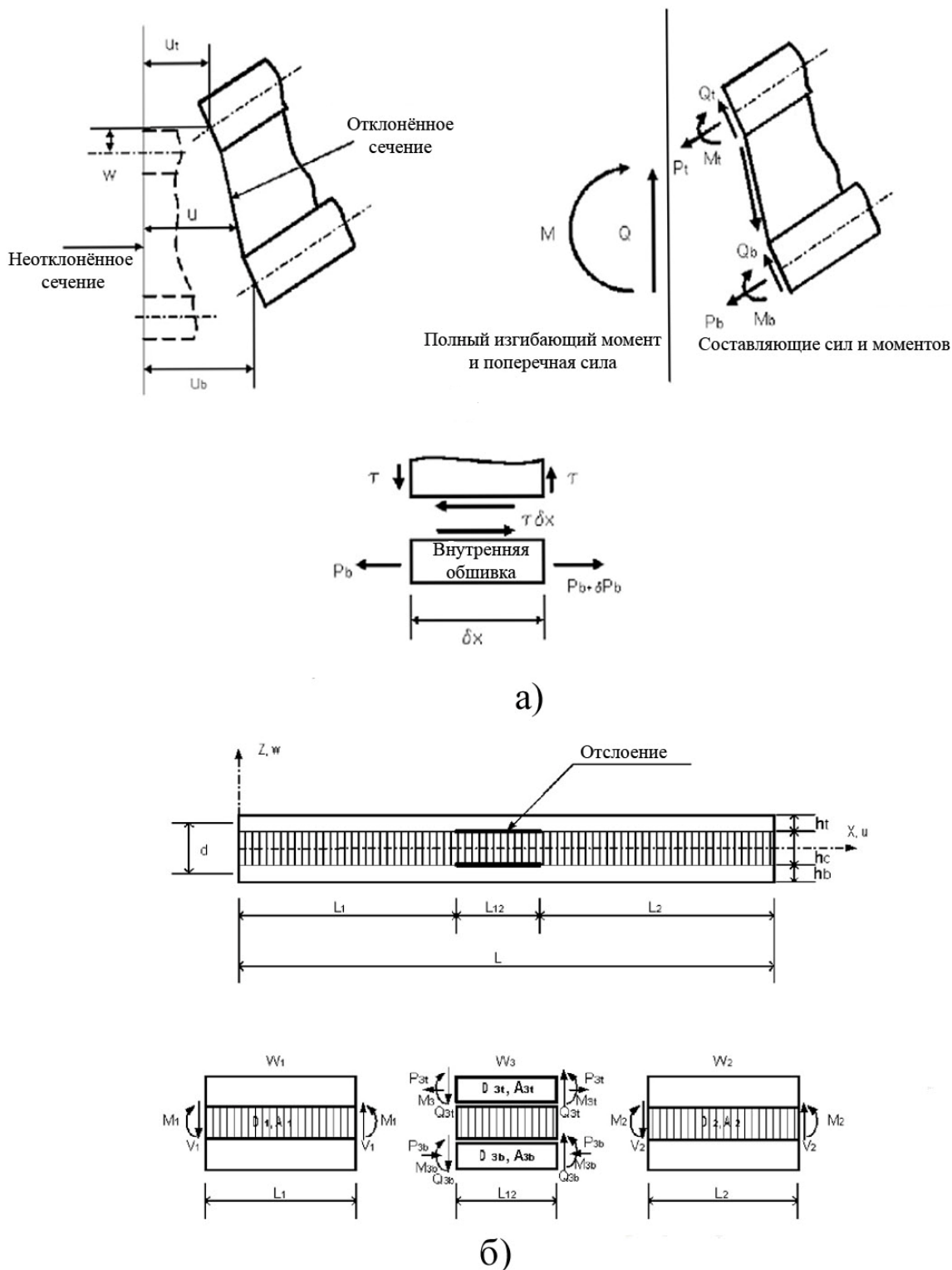


Рис. 2. Модель сотовой конструкции с отслоением обшивки
 а) модель трёхслойной конструкции; б) модель трёхслойной конструкции с отслоением

слоистой конструкции можно определить по следующей формуле:

$$D = \frac{E_f b h_t^3}{6} + \frac{E_f b h_t d^2}{2} + \frac{E_c b h_c^3}{12}. \quad (2)$$

Свободные члены в правой части данного выражения в указанном порядке соот-

ветствуют изгибу обшивки вокруг её центральной оси, изгибу обшивки вокруг центральной оси трёхслойной конструкции и изгибу сотового заполнителя. Изгиб обшивки вокруг центральной оси трёхслойной конструкции играет доминирующую роль, т.к. первый и третий члены составляют менее 1 % от второго члена, если

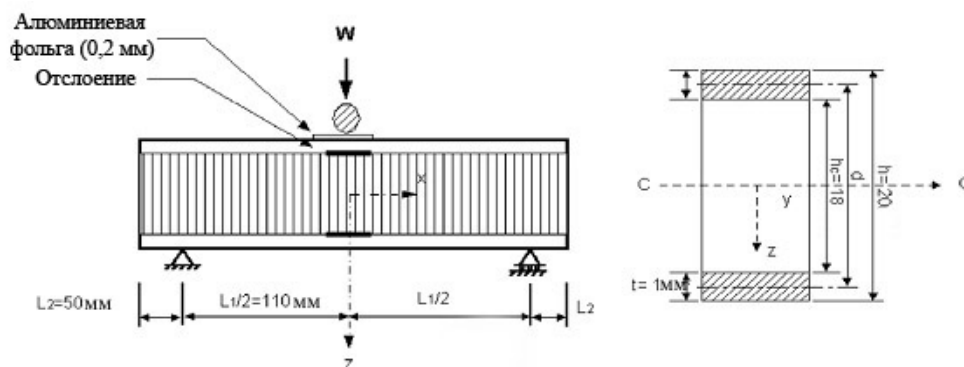


Рис. 3. Схема нагружения сотовой конструкции при определении изгибной жёсткости

$$\frac{d}{t} > 5,77 \frac{E_f}{E_c} \frac{h_t}{h_c} \left(\frac{d}{h_c} \right)^2 > 16,7. \quad (3) \quad \hat{O} = 1 - \frac{\sin hc_1 + (1 - \cos hc_1) b_h}{c}$$

У большинства сотовых конструкций $d/h_c = 1$ и h_t/h_c находится в интервале от 0,02 до 0,1 [5]. Если условие (3) выполняется в тех случаях, когда предельные значения отношения E_f/E_c находится между 167 и 835, то в этом случае уравнение (2) можно записать в виде

$$D = E_f \frac{bh_t d^2}{2}. \quad (4)$$

Сотовый наполнитель обладает низкой плотностью. Это обстоятельство играет важную роль при поперечных деформациях и должно быть учтено при расчёте изгибной жёсткости всей сотовой конструкции. Жёсткость трёхслойной конструкции при трёхточечном изгибе можно представить в виде [6]:

$$\frac{W}{d} = \left(1 + \frac{12E_f I}{Gbd^2 L^2} \left(\frac{3h_c d^2}{h_t^2 + 3d^2} \right) \hat{O} \right)^{-1} \times \frac{8E_f bh_t^3}{L^3} \left(1 + 3 \frac{d^2}{h_t^2} \right), \quad (5)$$

где

$$a^2 = \frac{2G(h_t^2 + 3d^2)}{E_f h_c h_t^3}, \quad c_1 = \frac{aL}{2}, \quad c_2 = aL_1,$$

$$b_h = \frac{\sin hc_1 - (1 - \cos hc_1) \tan hc_2}{\sin hc_1 \tan hc_2 + \cos hc_1},$$

Максимальное разрушающее напряжение S_{\max} трёхслойной конструкции при трёхточечном изгибе можно записать в виде

$$S_{\max} = \frac{WL}{4h_t^2} \left(\frac{b_h}{c_1} + \frac{2h_t^2 + h_c h_t}{h_t^2 + 3d^2} \left(1 - \frac{b_h}{c_1} \right) \right). \quad (6)$$

3.2 Определение собственных частот колебания

При дифференцировании уравнения движения трёхслойной конструкции с отслоением необходимо принять во внимание, что деформация сдвига в обшивке и продольное напряжение в наполнителе не учитываются. Поперечные напряжения при изгибе наполнителя и обшивки также не учитываются, так что поперечное перемещение w_i поперечных сечений конструкции одинаковы. При анализе трёхслойной конструкции рассматриваются три участка – область отслоения и две соседние области без отслоений обшивки, обозначенные $i=3$ и $i=1, 2$, соответственно.

Для области трёхслойной конструкции без отслоения продольные перемещения центральной плоскости обшивки обозначены u_i и u_b (рис. 2). С учётом геометрии распределения перемещений u_i , u_b и $\partial w / \partial x$ для обшивки выражение для $\partial u / \partial z$ можно записать в виде

$$h_c \frac{\partial u}{\partial z} = u_i + \frac{h_t}{2} \frac{\partial w}{\partial x} - u_b - \frac{h_b}{2} \frac{\partial w}{\partial x}.$$

Деформация сдвига g заполнителя определяется по формуле

$$g = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c}, \quad (7)$$

где $d = h_c + 1/2(h_t + h_b)$. Теперь можно найти напряжение в заполнителе при сдвиге из выражения

$$t = G_g = G_c \left(\frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c} \right). \quad (8)$$

Причём напряжение при сдвиге можно считать постоянным по всей высоте заполнителя при выполнении условия: $\partial t / \partial z = 0$. Величина усилия сдвига Q_c одинакова и в центральной плоскости обшивки, и, таким образом, по всей высоте заполнителя. Поперечная сила Q_c может быть определена как

$$Q_c = -td. \quad (9)$$

Суммарное усилие сдвига трёхслойной конструкции складывается из поперечных сил верхней Q_t и нижней Q_b обшивок, связанных с изгибными коэффициентами жёсткости D_t и D_b , соответственно, и из поперечной силы Q_c , связанной с напряжением при сдвиге в заполнителе. Следовательно, выражение для определения суммарного усилия сдвига можно записать в следующем виде:

$$Q = D_h \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - G_c d \left(\frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c} \right), \quad (10)$$

где $D_h = D_t + D_b$.

Продольные силы, действующие в средней плоскости обшивок (P_t и P_b), удерживают конструкцию в равновесии, т.к. $P_t = -P_b$, и вычисляются по формулам:

$$P_t = E_t h_t \frac{\partial u_t}{\partial x}, \quad P_b = E_b h_b \frac{\partial u_b}{\partial x}. \quad (11)$$

При рассмотрении продольного равновесия элемента нижней обшивки dx очевидно (рис. 2,а), что

$$dP_b = -tdx, \quad \frac{dP_b}{dx} = -t. \quad (12)$$

Для участков трёхслойной конструкции без отслоения ($i=1, 2$) продольная сила может быть определена исходя из выражений (11) и (12) при условии, что внешнее воздействие на конструкцию отсутствует, т.е. $\partial Q / \partial x = 0$:

$$P_{t,2} = -P_{b,2} = \frac{D_h}{D_g d} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g R \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (13)$$

$$\text{где } D_g = \frac{G_c}{h_c} \left(\frac{1}{A_t} + \frac{1}{A_b} \right), \quad R = \frac{d^2}{D_h} \left(\frac{A_t A_b}{A_t + A_b} \right).$$

Изгибающий момент в заполнителе M_c , связанный с равными по величине и противоположно-направленными силами P_t и P_b вдоль средней плоскости обшивки, находится как

$$M_c = P_b d = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g R \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (14)$$

Аналогично поперечному усилию суммарный изгибающий момент для участков трёхслойной конструкции без отслоения будет состоять из трёх компонентов. Он может быть определён как сумма момента, найденного по выражению (14), и момента, действующего на обшивку:

$$M_{c,1,2} = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g (1+R) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (15)$$

С другой стороны, суммарное усилие сдвига можно найти из отношения $Q = \partial M / \partial x$:

$$Q_{1,2} = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^5 w}{\partial x^5} - D_g (1+R) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right). \quad (16)$$

Суммарный изгибающий момент M_3 и поперечное усилие Q_3 для участка трёхслойной конструкции с отслоением находятся из выражений:

$$M_3 = -D_h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad Q_3 = -D_h \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}. \quad (17)$$

После некоторых преобразований для поперечных перемещений w уравнение движения трёхслойной конструкции без отслоений может быть записано включением инерционной силы в статическое уравнение изгиба, как показано в [6]:

$$\frac{\partial^6 w_{1,2}}{\partial x^6} - D_g (1+R) \frac{\partial^4 w_{1,2}}{\partial x^4} + \frac{m}{D_h} \left(\frac{\partial^4 w_{1,2}}{\partial x^4 \partial t^2} - D_g \frac{\partial^2 w_{1,2}}{\partial t^2} \right) = 0. \quad (18)$$

Уравнение движения для участка сотовой конструкции с расслоением можно записать как

$$\frac{\partial^4 w_3}{\partial x^4} + \frac{m}{D_h} \frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2} = 0. \quad (19)$$

При условии свободных гармонических колебаний: $w_i(x, t) = w_i(x) e^{j\omega t}$ и расчёта x как $x = Lx$, уравнения (18) и (19) можно записать в виде

$$\frac{\partial^6 w_i}{\partial x^6} - g_r \frac{\partial^4 w_i}{\partial x^4} - g \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} + g_g w_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (20)$$

$$\frac{\partial^4 w_3}{\partial x^4} - g w_3 = 0, \quad (21)$$

где $g_r = D_g L^2 (1+R)$, $g = \frac{mW^2 L^2}{D_h}$, $g_g = g D_g L^2$.

Решение уравнения (20) для участка трёхслойной конструкции $i = 1$ имеет вид:

$$w_1(x) = C_1^1 \cos a_1 x + C_2^1 \sin a_1 x + C_3^1 \cos hb_1 x + C_4^1 \sin hb_1 x + C_5^1 \cos hl_1 x + C_6^1 \sin hl_1 x, \quad (22)$$

где a_1^2 является корнем кубического уравнения $y^3 + g_r y^2 - g y - g_g = 0$, который остаётся действительным при варьировании параметров g_r, g, g_g ; b_1 и l_1 также являются действительными корнями того же кубического уравнения, однако становятся комплексносопряжёнными числами при варьировании параметров g_r, g, g_g . Решение уравнения (20) для участка конструкции $i = 2$ можно записать, как

$$w_2(x) = C_1^2 \cos a_2 x + C_2^2 \sin a_2 x + C_3^2 \cos hb_2 x + C_4^2 \sin hb_2 x + C_5^2 \cos hl_2 x + C_6^2 \sin hl_2 x, \quad (23)$$

где a_2 , b_2 и l_2 определяются так же, как a_1 , b_1 и l_1 , соответственно.

Подобным образом получаем решение для уравнения (23):

$$w_3(x) = C_1^3 \cos g_3 x + C_2^3 \sin g_3 x + C_3^3 \cos hg_3 x + C_4^3 \sin hg_3 x, \quad (24)$$

где $g_3 = g^{1/4}$.

Основные решения для трёхслойной конструкции с отслоением содержатся в выражениях (22)-(24). 16 неизвестных C_i^j ($j = 1, \dots, 6$ для $i = 1, 2$ и $j = 1, \dots, 4$ для $i = 3$) и частота колебаний ω определяются, исходя из граничных условий.

В случае $Atx = 0 (x = 0)$:

$$w_1(0) = 0, \quad w_1'(0) = 0, \quad (25)$$

$$Q_1 - Q_{1,r} - Q_{1,b} = 0, \quad Q_{1,c}(0) = 0. \quad (26)$$

В случае, если перемещение обшивки u_r, u_b ограничено сжимающей заклёпкой, про-

ходящей через всю трёхслойную конструкцию, $Atx = 1 (x = L)$:

$$M_2(1) = 0, Q_2(0) = 0, P_{1,t} = -P_{1,b} = 0. \quad (27)$$

В случае, если перемещение обшивки u_t, u_b вблизи свободного конца не ограничено $Atx = x_1 (x = L_1)$:

$$w_1 = w_3, \dot{w}_1 = \dot{w}_3, \quad (28)$$

$$M_1 = M_3, Q_1 = Q_2, P_{1,t}d = M_3; \quad (29)$$

$$Atx = x_2 (x = L_2):$$

$$w_2 = w_3, \dot{w}_2 = \dot{w}_3, \quad (30)$$

$$M_2 = M_3, Q_2 = Q_3, P_{2,t}d = M_3. \quad (31)$$

Выражения (25) – (31) представляют собой 16 однородных уравнений для определения неизвестных C_i^j из выражений (22) – (24). Характеристическое уравнение для характеристического числа получено путём приравнивания определителя матрицы коэффициентов C_i^j нулю, что является условием существования ненулевого решения. Соответствующие характеристические числа также могут быть определены при решении уравнений.

3.3 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Для выявления и определения местоположения повреждений в больших конструкциях необходимо применять методики, основанные на конечно-элементном анализе. Поиск неисправностей, основанный на АЧХ, использует измерения от небольшого числа датчиков и не нуждается в комплексной структурной модели. Сущность метода выявления повреждений, основанного на АЧХ, заключается в сравнении сигналов, полученных при измерении вибрации в высокочастотной области до и после повреждения. Во время поиска повреждений измеренные функции отклика испытываемых образцов должны быть занесены в базу изменений физи-

ческих параметров, соответствующих повреждениям. Существенные изменения в жёсткости и расслоение композитных конструкций влияют на АЧХ предсказуемым образом, так что частота собственных колебаний и скорость затухания повреждённой конструкции могут быть легко пересчитаны для отслоения.

В этом случае динамическую передаточную функцию для повреждённой конструкции можно представить в виде

$$G_{i,j}(f) = \frac{Y_{ij}(f)}{Y_{ii}(f)} = \frac{h_i^* h_j}{h_i^* h_i}, \quad (32)$$

где h - ряд входных данных для матрицы АЧХ приложенного возбуждения, Y_{ij} - поперечная спектральная функция. Тестовое воздействие имеет одну и ту же величину и место приложения во всех экспериментах. Передаточная функция – это отношение отклика спектральной плотности взаимно корреляционной функции между входом i и датчиком j конструкции к входной спектральной плотности автокорреляционной функции в точке i . Это безразмерная комплексная величина, которая показывает, как вибрация, являющаяся функцией частоты, передаётся между точками i и j конструкции. АЧХ не зависят ни от чувствительности, ни от степени свободы или инерционности измеренных спектральных плотностей. Поиск повреждений, основанный на АЧХ, достаточно точен, т.к. относительная вибрация отклика характерна для малых секций конструкции. Разница между АЧХ – это непрерывная функция с большим количеством минимальных и максимальных значений. И если возникает повреждение, то максимальные и минимальные значения сдвигаются относительно друг друга. Чувствительность к изменениям в АЧХ при среднем разрушении по большей части возрастает по мере того, как возбудитель и датчик приближаются к повреждению и возрастает частота возбуждения.

4. Полученные результаты

Расчётные значения всех необходимых для сравнительного анализа параметров были получены для образцов, результаты испытаний которых приведены в [3].

Снижение собственной частоты колебаний, соответствующее отслоению обшивки трёхслойной конструкции, в первую очередь, контролируется с помощью измерения изгибной жёсткости. Собственные частоты сотовой конструкции с отслоением, полученные в ходе вибрационных испытаний, сопоставляются с теоретически полученными результатами. Обшивка состоит из армированного эпоксикарбопласта толщиной 1 мм с наслоением [0/90/0/90]_s. Свойства и характеристики верхней и нижней обшивки идентичны. Свойства стеклоткани с предварительной пропиткой смолами и сотового заполнителя приведены в таблицах 1 и 2. На основании выражения (1) вычисляются упругие характеристики для каждого слоя обшивки: $D = 6,80 \text{ Нм}$, $A = 61,46 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$. Отношение $D = E_f b h_i^3 / 6$ позволяет определить эквивалентный модуль Юнга для листа обшивки: $E_f = 40,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

4.1 Исследование изгибной жёсткости

В первую очередь исследовано поведение трёхслойной сотовой конструкции с от-

слоениями при упругом трёхточечном изгибном нагружении. Коэффициент жёсткости при изгибе для трёхслойной конструкции, рассчитанный по выражению (4), равен $D = 8,16 \cdot 10^3 \text{ Нм}$.

На рисунке 4 показана экспериментальная зависимость нагрузки от перемещения образца без отслоения при трёхточечном изгибе. С использованием выражения (5) вычислена жёсткость трёхслойной конструкции при изгибе – 622 Н/мм, в то время как среднее измеренное значение составило 664 Н/мм. Образец сотовой конструкции разрушился при нагрузке 1695 Н. При такой нагрузке максимальное напряжение, рассчитанное по выражению (6), составило $256 \cdot 10^6 \text{ Па}$. На рисунке 5 видно, что с увеличением величины отслоения коэффициент жёсткости при изгибе снижается.

4.2 Измерение собственных частот колебания

Измерения показывают снижение собственных частот колебания с увеличением площади отслоения трёхслойной конструкции (рис. 6). Пунктирной линией показаны

Таблица 1. Характеристики сотового заполнителя

Параметр, единица измерения	Значение
Плотность, кг/м ³	80,1
Предел прочности при сдвиге в продольном направлении (F_x), Па	$1,90 \times 10^6$
Модуль сдвига в продольном направлении (G_x), Па	$70,3 \times 10^6$
Предел прочности при сдвиге в поперечном направлении (F_y), Па	$1,21 \times 10^6$
Модуль сдвига в поперечном направлении (G_y), Па	$37,2 \times 10^6$

Таблица 2. Характеристики стеклоткани с предварительной пропиткой смолами

Параметр, единица измерения	Значение
Модуль Юнга в направлении волокон (E_1), Па	$120,3 \times 10^9$
Модуль Юнга в поперечном направлении (E_2), Па	$7,63 \times 10^9$
Модуль сдвига (G_{12}), Па	$3,36 \times 10^9$
Коэффициент Пуассона (μ_2)	0,32
Объёмная плотность (ρ), кг/м ³	1510
Предел прочности на разрыв в направлении волокон (X_T), Па	$2,2 \times 10^9$
Предел прочности на сжатие в направлении волокон (X_C), Па	$1,4 \times 10^9$
Предел прочности на разрыв в поперечном направлении (Y_T), Па	$2,1 \times 10^9$
Предел прочности на сжатие в поперечном направлении (Y_C), Па	$1,3 \times 10^9$
Напряжение сдвига слоя в направлении волокон (S), Па	$0,226 \times 10^9$

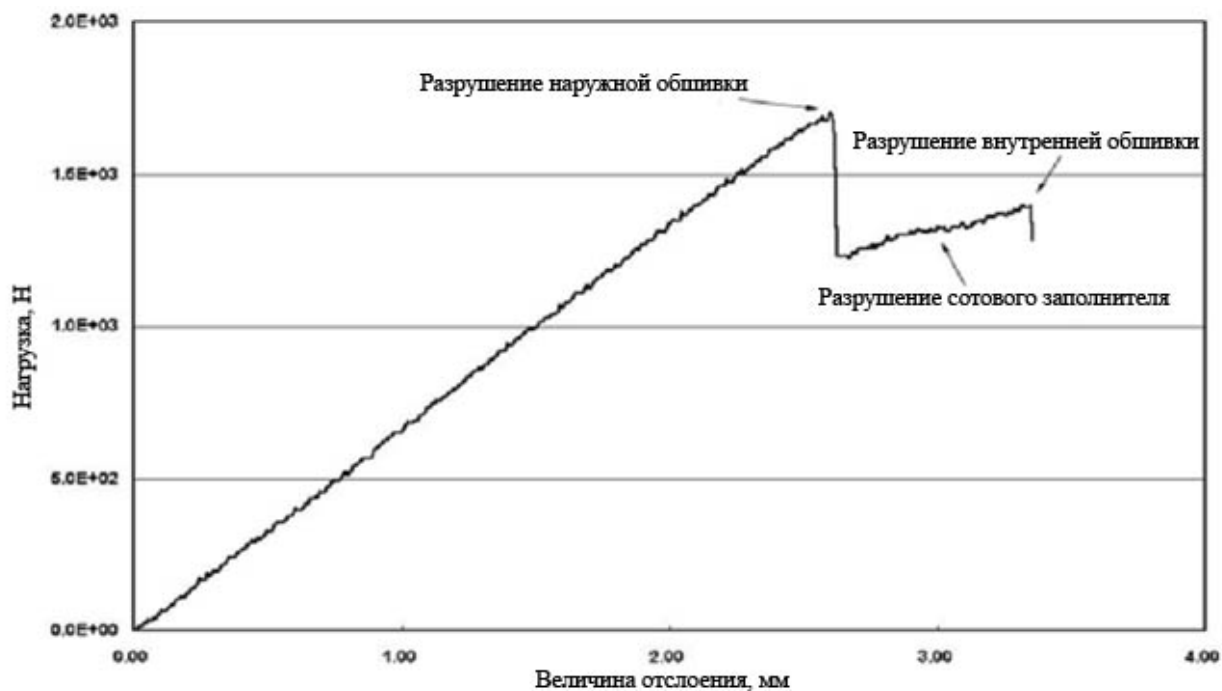


Рис. 4. Экспериментальная зависимость нагрузки от перемещения образца без отслоения при трёхточечном изгибе

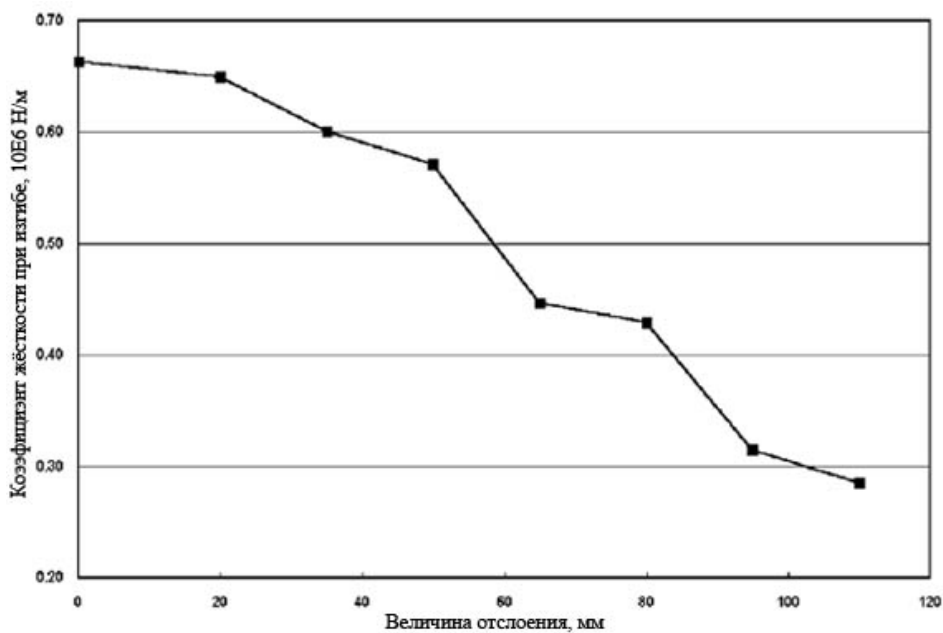


Рис. 5. Зависимость коэффициента жёсткости от величины отслоения

расчётные значения, полученные с помощью вибрационной модели, приведённой выше. Измеренная собственная частота колебания неповреждённой сотовой конструкции соста-

вила 165 Гц, в то время как расчётное значение – 178 Гц. Разница в полученных результатах связана с тем, что в расчётах не учитывалась масса клеевого слоя.

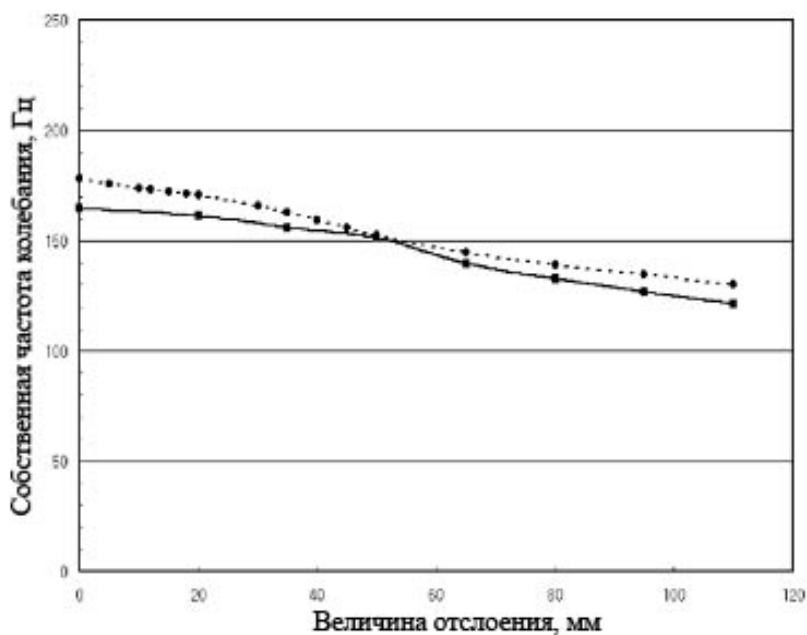


Рис. 6. Теоретическая (...) и экспериментальная (—) зависимости собственной частоты колебания от величины отслоения

4.3 Измерение АЧХ

Как видно на рисунке 7, частотный отклик СК с отслоением смещается в сторону низких частот по мере того, как величина отслоения увеличивается.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассчитанные по разработанной виб-

рационной модели значения параметров СК согласуются с экспериментально полученными данными. Следовательно, данная математическая модель может быть использована для решения задач оперативной диагностики элементов конструкции ЛА, выполненных в виде сотовых конструкций.

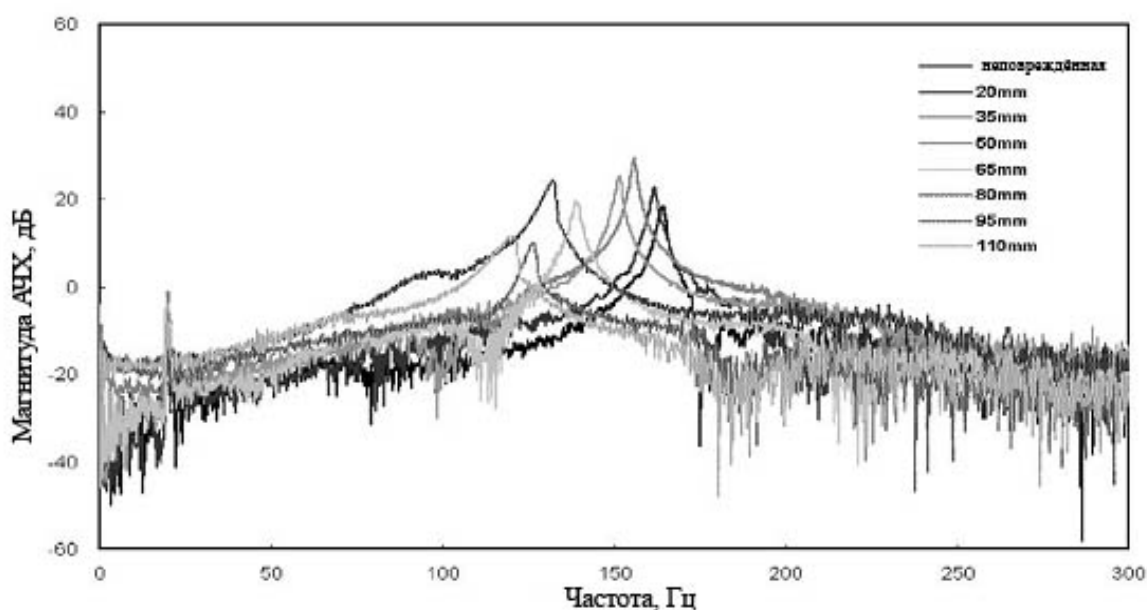


Рис. 7. Магнитуды АЧХ сотовых конструкций с различной величиной отслоения

Библиографический список

1. Тиц, С. Н. Анализ эксплуатационной надёжности планера самолёта Ан-124 «Руслан» [Текст]/С. Н. Тиц//Управление движением и навигация летательных аппаратов: сб. научных трудов XII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. - Самара, 2006. - С. 405-406.

2. Тиц, С. Н. Состояние и проблемы практического применения методов неразрушающего контроля планеров воздушных судов/С. Н. Тиц, А. Н. Коптев, Ф. Е. Ляшко// Известия Самарского научного центра Российской академии наук/Самарский научный центр Российской академии наук. - 2007. - Спец.вып. - С. 164-168.

3. Ким, Х. Ю. Исследование влияния отслоения в трёхслойной сотовой конструкции на её собственные частоты колебания и амплитудно-частотную характеристику /Х. Ю. Ким, В. Хвенг // Композитные конструкции. - 2002. - Вып. 55. - С. 51-62.

4. Ким, Х. Ю. Вибрационный метод выявления повреждений композитных конструкций / Х. Ю. Ким // Акустика и вибрация. - 2003. - Вып. 259. - С. 1131-1146.

5. Ендогур, В. В. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование [Текст]/ А. И. Ендогур, М. В. Вайнберг, К. М. Иерусалимский. - М.: Машиностроение, 1986. - 200 с.

6. Аллен, Х. Г. Анализ и расчёт трёхслойных конструкций [Текст]/ Х. Г. Аллен. - Пергамон Пресс. - Оксфорд, 1969. - 154 с.

References

1. Tits, S. N. Analysis of AN-124 "Ruslan" airframe operate reliability / S. N. Tits // Propulsion control and aircraft navigation: transactions of the XII All-Russian scientific-and-technical seminar. - Samara, 2006 - pp. 405-406.

2. Tits, S. N. State and problems of practical application of methods of non-destructive airframe control /S. N. Tits, A. N. Koptev, F. Ye. Lyashko // Izvestiya (news) of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences / Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences. - 2007. - Special issue - pp. 164-168.

3. Kim, Kh. Yu. Analysis of the impact of peeling in a three-layer honeycomb sandwich on

its natural vibration frequencies and amplitude-frequency characteristics. // Kh. Yu. Kim, V. Khveng // Composite structures. - 2002. - Issue 55. - pp. 51-62.

4. Kim, Kh. Yu. Vibrational method of detecting damages in composite structures // Kh. Yu. Kim // Acoustics and vibration. - 2003. - Issue 259. - pp. 1131-1146.

5. Yendogur, V. V. Honeycomb sandwiches. Choice of parameters and designing / A. I. Yendogur, M. V. Vainberg, K. M. Ierusalimsky. - Moscow: "Mashinostroyeniye, 1986 - 200 pp.

6. Allen, H. G. Analysis and design of three-layer structures / H. G. Allen. - Pergamon Press. - Oxford, 1969. - 154 pp.

DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL OF AIRCRAFT HONEYCOMB SANDWICHES

© 2008 S. N. Tits

Samara State Aerospace University

A vibrational model of a three-layer honeycomb sandwich with partial skin peeling has been developed. The impact of peeling amount on the natural frequency of vibration and the amplitude-frequency characteristic has been analysed. Comparative analysis of design values and experimentally obtained results has been made.

Honeycomb sandwiches, multilayer panels, peeling, vibration theory, technical condition control.

Информация об авторе

Тиц Сергей Николаевич, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: композитные материалы, неразрушающие методы контроля технического состояния авиационных конструкций.

Tits, Sergey Nikolayevitch, assistant of the department of aircraft maintenance, Samara State Aerospace University. Area of research: composite materials, non-destructive methods of aircraft structure technical state.

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

© 2008 С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Даётся анализ структурной модели индивидуального прогнозирования параметров надёжности космической радиоэлектронной аппаратуры.

Прогнозирование, надёжность, качество, структурная модель, космические радиоэлектронные средства, информативные параметры, обучающий эксперимент

Эффективность функционирования радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники зависит от многих факторов, в том числе от качества работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Одним из основных показателей качества РЭА является надёжность, которая уменьшается по мере увеличения сложности аппаратуры. При разработке, изготовлении и эксплуатации космической аппаратуры принимаются разнообразные меры, направленные на обеспечение её безотказности. Однако полностью устранить возможность появления отказов не удаётся. Поэтому задача поддержания работоспособного состояния аппаратуры и изделия в целом заключается, прежде всего, в своевременном прогнозировании отказов и устранении причин их появления [1].

Прогнозирование отказов и изменение свойств аппаратуры и изделия может быть проведено на различных этапах её жизненного цикла (контроль, испытания, применение, эксплуатация). Наибольшую точность обеспечивает индивидуальное прогнозирование (ИП). Его смысл заключается в том, что по величине информативного параметра или по результатам наблюдения за каждым конкретным экземпляром с использованием оператора прогнозирования делается вывод о потенциальной надёжности этого экземпляра, т. е. о возможности его использования по назначению в течение заданного срока службы [2]. Для построения оператора (математической модели), алгоритма, методики ИП и управления качеством аппаратуры требуется структурная модель. Такая модель строится в графической форме в виде укрупнённой

технологической схемы с описанием функций, выполняемых составными частями [3].

Предложенные в [4, 5] структурные модели для ИП микросборок в ряде случаев не обеспечивают создания точных операторов и эффективных методик прогнозирования. Особенно это касается специализированной космической аппаратуры.

Проведенный анализ показал, что причиной этого могут быть низкая адекватность исследовательских испытаний реальным условиям эксплуатации, некорректность выбора информативных параметров, отсутствие оценки качества программного продукта и аттестации методики ИП, низкая точность оператора прогнозирования при изменении конструктивно-технологического варианта (КТВ) аппаратуры.

Для повышения точности и достоверности ИП предлагается новая структурная модель прогнозирования (рис. 1), которая включает в себя следующие взаимосвязанные этапы:

1. Анализ методов ИП. Из множества методов выбираются несколько наиболее полно отвечающих поставленной задаче ИП.

2. Предварительный выбор информативных параметров и выбор параметров прогнозирования. Выбираются измеряемые параметры структуры микросборок, устройств, несущих необходимую информацию о качестве, из которых впоследствии будут отбираться наиболее значимые, дающие минимальную ошибку прогнозирования.

3. Разработка методики исследовательских испытаний. Определяется объём

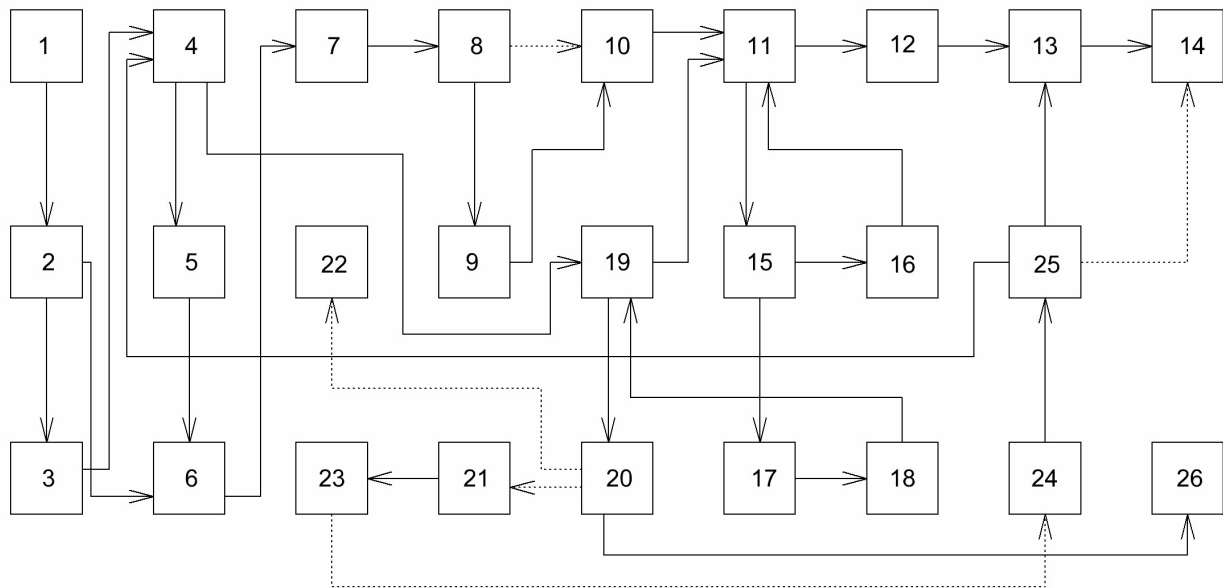


Рис. 1. Структурная модель индивидуального прогнозирования показателей качества космической РЭА

выборки, составляется программа испытаний, выбираются необходимое оборудование, средства измерения и контроля, проводится метрологическое обоснование.

4. Обучающий эксперимент. Проводятся испытания в заданном режиме определённого количества (выборки) исследуемых изделий в течение требуемого времени, обычно равного времени последующего прогнозирования, и определение фактического состояния (годен, не годен) каждого экземпляра выборки к моменту окончания испытаний. Оценивается адекватность выборки по количеству годных и негодных изделий. Затем проводится физико-технический анализ отказов.

5. Выбор информативных параметров. Проводится окончательный выбор информативных параметров по величине коэффициента корреляции с прогнозируемым параметром.

6. Выбор метода ИП. Окончательно выбирается один метод прогнозирования, наиболее точно отражающий поведение исследуемых параметров и имеющий минимальную ошибку прогнозирования.

7. Разработка алгоритма. Проводится перевод всей расчётно-математической части выбранного метода ИП на язык блок-схем алгоритмов, где определяется последовательность выполнения отдельных пунктов расчётов, а также условия их выполнения.

8. Разработка программы. Производится выбор языка программирования высокого уровня, позволяющего производить сложные математические расчёты, разрабатываются программы ИП или выбирается специализированный пакет прикладных программ для математических расчетов. Далее проводится формальное описание алгоритма выбранного метода ИП, сервисных процедур и интерфейса с пользователем в соответствии с требованиями выбранной программной среды.

9. Оценка качества программного продукта. Проводится статистический анализ, тестирование, оценка надёжности (статистические испытания, оценка надёжности функционирования по результатам испытаний), экспертиза, оценка научно-технического уровня, анализ конфигурации программ.

10. Разработка оператора ИП. По параметрам обучающей выборки разрабатывается модель или оператор ИП, имеющий минимальную ошибку расхождения с экспериментальными данными и приемлемые показатели эффективности.

11. Оценка качества оператора ИП. Определяются выбранные показатели качества прогнозирования.

12. Разработка рабочей методики. Определяется набор измеряемых параметров рабочих выборок, последовательность действий при проведении измерений выбранных параметров и в процессе ИП, пороговых зна-

чений оператора и критериев качества прогнозирования.

13. Аттестация методики. Проводится оценка степени соответствия полученных показателей оптимальным нормам, установленным на стадии её разработки из условия обеспечения минимальных значений вероятности ошибочных решений, рисков изготовителя и потребителя, максимальных показателей экономической эффективности. Методике присваивается категория качества (первая, вторая или третья).

14. Рабочее прогнозирование. Определяются потенциально ненадёжные изделия с данным КТВ, не участвовавшие в обучающем эксперименте, по измеренным значениям информативных параметров и выбранному оператору прогнозирования.

15. Оптимизация оператора. Если качество прогнозирования не удовлетворяет определённым критериям, то проводится оптимизация оператора или модели ИП, например, методом крутого восхождения с использованием методов планирования эксперимента.

16. Уточнение оператора ИП. Проводится корректировка оператора индивидуального прогнозирования по результатам проведённого эксперимента.

17. Уточняющий обучающий эксперимент. Если полученные показатели качества оператора ИП не удовлетворяют требуемым, то проводится дополнительный уточняющий эксперимент.

18. Разработка или выбор новых информативных параметров. В случае, если с помощью оптимизации не удалось добиться заданного качества прогнозирования, то производится выбор новых информативных параметров для ИП.

19. Определение уровней. Этап, позволяющий определить пороговые значения классифицирующей или разделяющей функции оператора ИП, которые обеспечили бы максимально возможное качество прогнозирования.

20. Разработка рекомендаций. Разрабатываются рекомендации по изменению технологического маршрута, операционных технологий, конструкции РЭА и отдельных электрорадиоизделий или введению электрофи-

зической диагностики на определённых операциях изготовления.

21. Технологический процесс (ТП) изготовления РЭА. Проводится анализ рекомендаций с разработчиком технологического процесса производства РЭА.

22. Контроль параметров РЭА. Проводится анализ рекомендаций по введению электрофизической диагностики с разработчиком контрольных операций.

23. Изменение КТВ. Вносятся изменения в конструкцию аппаратуры или технологию её изготовления, направленные на устранение несоответствий и значимых дефектов, выявленных в процессе контроля параметров РЭА. При этом учитываются данные физико-технического анализа, полученные по результатам обучающего эксперимента и эксплуатации аппаратуры.

24. Уточнение методики. Проводятся уточнение и корректировка рабочей методики ИП с учетом модернизации КТВ.

25. Проверка уточнённой методики. Проводится проверка уточнённой методики ИП на соответствие заданным требованиям.

26. Эвристическое прогнозирование или отбраковка. Проводится выбор критерия (уровня) отбраковки потенциально ненадёжных изделий и на основе данного критерия проводится отбраковка или классификация.

Особенностью данной модели является возможность учёта “технологической наследственности” при выборе и оценке показателей качества, информативных параметров и свойств аппаратуры и изделия, наличие обратных информационных связей, использование корректирующих звеньев, адекватность этапа обучающего эксперимента, возможность согласованной модернизации конструктивно-технологических вариантов аппаратуры, проектирования контролепригодных конструкций и стабильных, хорошо управляемых технологических процессов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Предложена структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической радиоэлектронной аппаратуры, которая повышает адекватность исследова-

тельских испытаний, учитывает “технологическую наследственность” при выборе и оценке показателей качества, информативных параметров и свойств аппаратуры.

2. Использование данной структурной модели позволяет повысить точность и достоверность операторов прогнозирования при изменении конструктивно-технологического варианта аппаратуры.

Библиографический список

1. Кейджян Г. А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. – М.: Радио и связь, 1987.
2. Пиганов М. Н. Индивидуальное про-

гнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок. – М.: Новые технологии, 2002.

3. Рабочая книга по прогнозированию / Редкол.: И. В. Бестужев-Лада (отв. ред.). – М.: Мысль, 1982.

4. Пиганов М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов микросборок. – Самара: СГАУ, 1999.

5. Карпов О. В., Пиганов М. Н. Структурная модель управления качеством микросборок на этапе индивидуального прогнозирования // Вестник СГАУ. Серия “Актуальные проблемы радиоэлектроники”. – Самара: СГАУ, 2004. Вып. 9. - С. 101 – 105.

References

1. G. A. Kaydgyan. Forecasting microelectronic equipment reliability on the basis of LIC (Large Integrated Circuits) Moscow. «Radio i svyaz» (Radio and Communication), 1987.

2. M. N. Piganov. Individual forecasting of microassembly element and component quality indices. – Moscow. «Novye Technologii» (New Technologies), 2002.

3. Manual on forecasting. I. V. Bestuzhev

Lada-Moscow; «Mysl» (Thought), 1982.

4. M. N. Piganov. Individual forecasting of microassembly element quality indices. – Samara, SSAU, 1999.

5. O. V. Karpov, M. N. Piganov. Structural model of microassembly quality control at the stage of individual forecasting. SSAU Vestnik. «Topical problems of radioelectronics» series. – Samara, SSAU, issue 9, pp. 101-105.

STRUCTURAL MODEL OF INDIVIDUAL FORECASTING OF SPACE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT PARAMETERS

© 2008 S. V. Tyulevin, M. N. Piganov

Samara State Aerospace University

The paper presents the analysis of a structural model of individual forecasting of space radioelectronic equipment reliability parameters.

Forecasting, reliability, quality, structural model, space radioelectronic devices, informative parameters, instructional experiment.

Информация об авторах

Тюлевин Сергей Викторович, первый заместитель генерального директора, главный инженер ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: надёжность космических радиоэлектронных средств, отказы, прогнозирование показателей качества.

Пиганов Михаил Николаевич, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств СГАУ. Область научных интересов: элементы космической аппаратуры, индивидуальное прогнозирование надёжности радиоэлектронных средств.

Tyulevin, Sergei Victorovitch, first deputy of general manager, chief engineer of Central Design Bureau «CSKB-Progress». Area of research: reliability of space radioelectronic devices, failures, forecasting of quality indices.

Piganov, Mikhail Nicolayevitch, head of department of design and construction of radioelectronic devices, SSAU. Area of research: elements of space equipment, individual forecasting of reliability of radioelectronic devices.

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ

© 2008 В. А. Барвинок¹, Ю. Е. Паламарчук², А. Н. Кирилин²,
В. П. Самохвалов¹, В. М. Вершигорев²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
²ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ-Прогресс”

Приведены результаты экспериментальных исследований по выбору материалов для изготовления токопроводящих и корпусных элементов индукторов для магнитно-импульсной штамповки. Рассмотрены различные варианты конструкции индукторов, определена их эффективность по величине деформации трубчатой заготовки. Даны рекомендации на проектирование рабочих индукторных систем для производственных условий.

Индукторы, материалы, магнитные поля, эффективность, экспериментальные исследования, мелко-серийное производство

Мощные магнитные поля успешно применяются для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) давлением. Инструментом являются индукторы - прочные катушки индуктивности, которые служат генераторами магнитного поля при разряде батарей высоковольтных конденсаторов.

Одной из важнейших задач повышения технико-экономических показателей магнитно-импульсной обработки металлов является экономия дефицитных материалов, в первую очередь цветных металлов, применяемых для изготовления токопроводов индукторных систем.

Токопроводы индукторов для обработки деталей диаметром более 50 мм преимущественно изготавливаются методом навивки медной проволоки прямоугольного сечения на оправку. Расход медной проволоки на один индуктор может колебаться от 0,3 кг до 80 кг и более в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки.

В настоящее время как в РФ, так и за рубежом медь - более дефицитный материал, чем алюминий. По прогнозам, в будущем дефицит меди по сравнению с алюминием будет возрастать. Поэтому вопрос применения алюминия для индукторных систем вместо меди является актуальным.

Для индукторов малого диаметра необходимо подобрать материал, мало отличающийся от меди по электрическим свойствам и превышающий его по механическим характеристикам.

Материал токопровода, заменяющий медь или её сплавы в индукторах большого диаметра, должен иметь электрофизические и механические характеристики, близкие к меди.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению эффективности работы индукторов с токопроводами, изготовленными из стали, молибдена, алюминия, провода типа БПВЛ, и индукторов с тоководом из медной проволоки.

В таблице 1 приведены свойства материалов, которые были использованы для изготовления исследуемых индукторов.

Первая серия экспериментов бала направлена на определение эффективности применения различных материалов при изготовлении индукторных систем для деформирования заготовок малого диаметра. Для этого были изготовлены одновитковые цилиндрические индукторы с одинаковыми геометрическими размерами из меди, стали и молибдена. Рабочее отверстие индукторов изготовлено под цилиндрическую деталь диаметром 10 мм, длина рабочей зоны индуктора равнялась 3 мм.

В эксперименте проводились замеры напряжённости импульсного магнитного поля в зазоре индуктор-заготовка и определялась величина разрядного тока для энергии разряда более 4 кДж.

В качестве заготовки использовалась трубка из материала АД0 диаметром 10 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Эксперименты про-

Таблица 1. Физико-механические свойства металлов, используемых для изготовления токопроводов индукторов

Параметр	Медь М1, М2	Алюминий А1	Сталь Ст20	Молибден ВМ1
Удельное электрическое сопротивление, мм ² ·Ом/м при 20°С	0,01724	0,028	0,08	0,052
при 75°С	0,02135	0,0344	-	-
Плотность, кг/м ³	8900	2700	7860	10200
Предел пропорциональности, кг/м ²	2,5	3÷4	30	-
Предел прочности, кг/м ²	20÷24	8	48	70
Модуль упругости, н/м ²	1,15·10 ¹¹	0,7·10 ¹¹	2·10 ¹¹	3,44·10 ¹¹
Удельная теплоёмкость, $\frac{\Delta \theta \cdot \dot{m}}{e \dot{a} \cdot \dot{a} \dot{a} \dot{a}} = \frac{\dot{A} \dot{x}}{e \dot{a} \cdot \dot{a} \dot{d} \dot{a} \dot{a}}$	390	816	456	146
Температура плавления, °С	1083	658	1535	2625
Цена материала, руб/т	890	780	126	-

водились на установке ИУ-20 с максимальной запасаемой энергией 20 кДж, максимальным рабочим напряжением 20 кВ, ёмкостью конденсаторной батареи 90 мкФ и частотой короткого замыкания 34 кГц.

Эффективность работы индукторов с токопроводами из различных материалов сравнивалась по величине относительной деформации заготовок и величине давления магнитного поля, определяемого в зазоре между индуктором и заготовкой.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2. Например, из неё следует, что давление магнитного поля при энергии 3,3 кДж на медном токопроводе выше, чем на молибденовом на 5,6 %, а по сравнению со стальным - на 38 %. Величина относительной деформации заготовки соответственно выше при медном токопроводе на 27 % по сравнению с молибденовым, а со стальным - на 34%. Аналогичная зависимость наблюдается и при других энергиях разряда.

Таким образом, для получения одинаковой величины деформации заготовки необходимо увеличение энергии разряда для индукторов со стальными токопроводами при-

мерно в 1,3-1,5 раза, для индукторов с молибденовым токопроводом в 1,05-1,1 раза по сравнению с индуктором с медным токопроводом.

Основные механические параметры стали и молибдена существенно (в три-шесть раз) выше, чем у меди.

Если сравнивать прямоугольные провода из меди и стали, то для равенства их электрического сопротивления сечение стального провода должно быть в 4,5 раза больше. Если считать, что стороны сечения изменяются в равной степени, то линейные размеры стального провода будут в $\sqrt{4,5} = 2,12$ раз больше, чем медного. Электрическое сопротивление молибдена в 3,3 раза больше, чем у меди, а линейные размеры соответственно больше в 1,8 раза.

Протекание большого импульсного тока сопровождается наличием скин-эффекта, т.е. ток течёт вблизи поверхности проводника и вызывает её сильный нагрев. В медном проводнике величина скин-слоя мала и наблюдается выгорание рабочей кромки и выплески металла с поверхности. В стальном токоп-

Таблица 2. Результаты экспериментов по определению эффективности индукторов

№ п/п	Материалы токопровода индуктора	Энергия разряда, кДж	Давление магнитного поля, кг/мм ²	Величина относительной деформации, %	Ток разряда, кА
1	Медь М1, М2	1,5	7,4	-	-
		2,2	9,3	0,16	203
		3,3	13,2	0,29	219
		4,6	16,6	0,37	238,2
		8,6	23,5	-	258,4
		10	29,5	-	278
		11,8	-	-	304
2	Сталь ст20	1,5	5,7	-	-
		2,2	7,4	0,125	-
		3,3	8,3	0,195	220
		4,6	10,05	0,27	235
		8,6	12,1	-	258
		10	14,6	-	268
		11,8	-	-	302
3	Молибден ВМ1	1,5	7,3	-	-
		2,2	7,9	0,15	-
		3,3	12,47	0,212	186
		4,6	16,4	0,3	211
		8,6	21,3	-	238,1
		10	28,1	-	278
		11,8	-	-	304

роводе величина скин-слоя значительно больше. Поэтому нагрев более равномерный, что заметно по цветам побежалости на срезе токопровода в результате протекания большого импульсного тока и возникновения при этом высокой температуры. В токопроводе из

молибдена появляются радиальные трещины, которые приводят к его разрушению (рис. 1, 2). Для индукторов с диаметрами более 100 мм, когда применение его точечной спирали экономически невыгодно, была опробована возможность применения алюминиевых прямо-

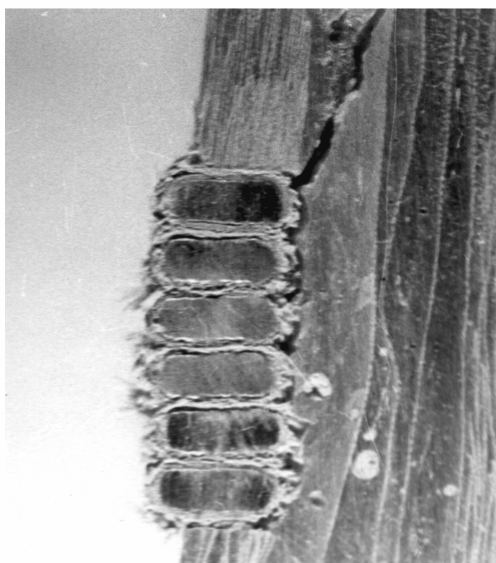


Рис. 1. Характер разрушения вставки токопровода из молибдена

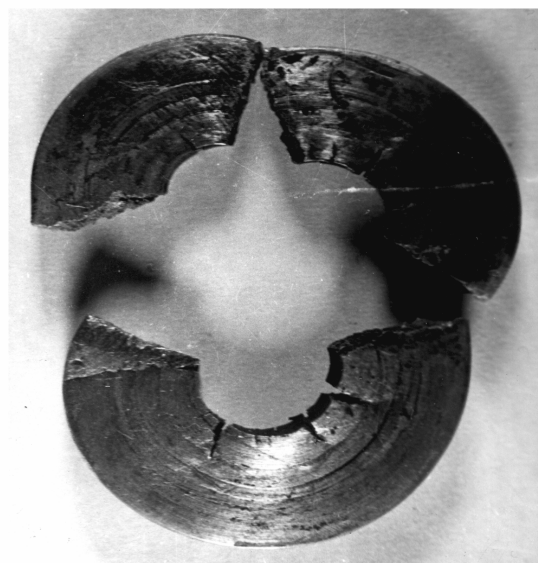


Рис. 2. Характер разрушения корпуса многовиткового индуктора

угольных проводов в качестве токопровода индуктора.

Одной из причин отсутствия внедрения алюминиевых проводов для изготовления индукторов в МИОМ является мнение о недостаточной прочности алюминиевых проводов по сравнению с медными.

Если сравнивать одинаковые по длине прямоугольные провода из меди и алюминия, то для равенства их электрического сопротивления сечение алюминиевого провода должно быть в 1,6 раза больше, а линейные размеры должны быть больше в 1,27 раза. Отношение временных сопротивлений меди и алюминия составляет примерно 0,33 (табл. 1).

При этом прочность алюминиевого провода по сравнению с медным будет составлять лишь $0,33 \cdot 1,6 \cdot 0,58 \%$ на растяжение и $0,33 \cdot 1,273 \cdot 0,68 \%$ на изгиб.

Но для индукторов большого диаметра основным требованием является обеспечение устойчивости спирали индуктора при действии радиальных усилий. Поэтому для обеспечения прочности алюминиевого провода необходимо увеличить его сечение по сравнению с медным в 1,7 раза.

Для сравнения технико-экономических характеристик были изготовлены индукторы из медной и алюминиевой прямоугольной шины сечением 10 x 2 мм, диаметром 60 мм и с числом витков, равным 7.

В качестве заготовок использовались трубы из АМг3 толщиной 1,0 и 1,5 мм и диаметром 60 мм. В процессе экспериментов эффективность работы индукторов оценивалась по величине относительной деформации заготовки. Результаты экспериментов приведены в таблице 3. Из неё следует, что эффективность работы индуктора с алюминиевым токопроводом составляет 0,7-0,75 по сравнению с индуктором с медным токопроводом. Для достижения равной деформации необходимо увеличить энергию разряда установки для индукторов с алюминиевым токопроводом примерно в 1,2...1,3 раза. Установлено, что предельная радиальная деформация витков алюминиевого токопровода, равная $e = 0,02$ (начало разрушения индуктора), наступает при давлении магнитного поля в 1,4 раза меньшем, чем для медного токопровода. Очевидно, что влияют инерционные силы, зависящие от массы витка токопровода.

Из-за большей теплоемкости алюминия (в 2,25 раза выше меди) одинаковый температурный режим в алюминиевом проводнике наступает при энергии в 1,4-1,5 раза меньшей, чем для медного токопровода, т.е. алюминиевый токопровод должен быть в 1,4 раза в сечении больше.

Так как для алюминия допустимое напряжение в три раза меньше, чем для меди, то запас по прочности алюминиевых спира-

Таблица 3. Результаты сравнения эффективности медного и алюминиевого токопроводов

Марка материала	Индуктивность системы индуктор-заготовка (Гн)	Энергия разряда, кДж	Давление м.п. кг/м ²	Деформации заготовки, %
Медная проволока прямоугольного сечения	$0,28 \cdot 10^6$	1,6	-	-
		1,8	-	-
		2,2	0,54	-
		2,8	0,68	2,7
		3,3	0,81	4,0
		4,0	0,94	5,0
Алюминиевая проволока прямоугольного сечения	$0,3 \cdot 10^6$	1,6	-	-
		1,8	-	-
		2,2	0,39	-
		2,8	0,51	1,9
		3,3	0,58	2,6
		4,0	0,64	3,4

лей на растяжение под действием радиальных сил будет меньше, чем медных спиралей. Таким образом, обеспечение условия прочности для алюминиевых индукторов несколько хуже, чем для медных. Однако при расчётах индукторов больших диаметров, в которых абсолютные значения среднего напряжения растяжения малы, затруднений с обеспечением условия прочности на растяжение не было.

Одним из эффективных методов снижения затрат на изготовление индукторов в мелкосерийном, штучном производстве может служить применение провода типа БПВЛ.

Провод марки БПВЛ - провод с поливинилхлоридной изоляцией, с жилой из медных проволок, а провод БПВЛА - с алюминиевой жилой. Данный провод применяется для сетей напряжением до 500 В и выпускается сечением до 95 мм².

При изготовлении индукторов для МИОМ 40-45 % времени приходится на изолирование шины перед навивкой спирали. Применение провода БПВЛ позволяет снизить затраты на изготовление индукторов, которые могут использоваться в экспериментальном и мелкосерийном производстве. Эффективность работы индукторов из провода БПВЛ также оценивалась по величине относительной деформации заготовки (табл. 4).

Снижение эффективности работы токопроводов из БПВЛ происходит из-за круг-

лой формы проводника. Ток по сечению токопровода распределяется более равномерно, меньше сказывается “эффект близости”, чем у проводников прямоугольной формы, когда ток сосредотачивается в основном в зоне, прилегающей к заготовке.

Кроме того, эксперименты показали, что при одинаковом сечении температура нагрева токопровода из БПВЛ на 10-12 % выше, чем для медного токопровода при одинаковой энергии разряда. Поэтому и характер разрушения индукторов из провода БПВЛ показывает потерю диэлектрических свойств полиэтиленовой изоляции провода.

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Индукторы диаметром более 50 мм из алюминия могут иметь высокие технико-экономические показатели, по крайней мере, не хуже, чем индукторы из медных проводов, в том числе и по обеспечению электродинамической прочности.

2. Расширение применения алюминия для изготовления индукторов диаметром более 50 мм позволит не использовать дефицитную медь.

3. Применение провода типа БПВЛ для изготовления индукторов для мелкосерийного и штучного производства позволяет значительно снизить расходы и время на изготовление индукторных систем.

Таблица 4. Результаты экспериментов по определению эффективности индукторов с шиной из БПВЛ и меди

Энергия разряд, кДж	Деформация заготовки ϵ , %		Коэффициент эффективности по отношению к медному индуктору
	Индуктор из БПВЛ	Медный индуктор	
1,8	7,07	9,8	0,72
2,2	9,6	12,8	0,75
2,8	13,25	17,25	0,768
3,3	19,45	22,5	0,86
4,0	25,9	30,6	0,846

CHOICE OF MATERIALS FOR MAKING INDUCTOR SYSTEMS

© 2008 V. A. Barvinok¹, Yu. Ye. Palamartchuk², A. N. Kirilin²,
V. P. Samokhvalov¹, V. M. Vershigorov²

¹Samara State Aerospace University

²Central Design Bureau "Progress"

The paper presents the results of experimental investigations concerning the choice of materials for making current-conducting and frame elements of inductors for pulse magnetic forming. Various kinds of inductor construction are considered, their efficiency as to the amount of deformation of a tubular blank is determined. Recommendations on the designing of operating inductor systems for production conditions are given.

Inductors, materials, magnetic fields, efficiency, experimental investigations, short-scale production

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НИИ технологий и проблем качества, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Область научных интересов: физика и математическое моделирование тепловых и деформационных процессов в твёрдых телах, разработка физических и математических моделей процессов взаимодействия ускоренных потоков плазмы с твёрдым телом.

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Кирилин Александр Николаевич, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Самохвалов Владимир Петрович, доцент, СГАУ, доктор технических наук, профессор.

Вершигоров Вячеслав Михайлович, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Barvinok, Vitaly Alexyevitch, Doctor of Technical Science, professor, Correspondence Member of the Russian Academy of Sciences. Director of Research Institute of technologies and quality problems, Head of the Department of aircraft construction and quality management in mechanical engineering. Area of research: physics and mathematical modeling of thermal and deformation processes in solids, developing physical and mathematical models of processes of interaction between accelerated plasma flows and a solid body.

Palamartchuk, Yuri Yefimovitch, head of department, Central Design Bureau "Progress".

Kirilin, Alexander Nikolayevitch, general director, doctor of Technical Science, professor, Central Design Bureau "Progress".

Samokhvalov, Vladimir Petrovitch, Associate Professor, SSAU, Doctor of Technical Science, professor.

Vershigorov, Vyacheslav Mikhailovitch, Deputy General Director for General Matters, Central Design Bureau "Progress".

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

© 2008 В. А. Барвинок¹, Ю. Е. Паламарчук², А. Н. Кирилин²,
В. П. Самохвалов¹, В. М. Вершигоров²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
²ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Приведены основные классы индукторных систем, применяемых в магнитно-импульсной штамповке. Отмечены факторы, влияющие на эксплуатационные свойства конструкции. Рассмотрены основные режимы работы индукторных систем: на высокочастотных и низкочастотных установках и в режиме многоциклового нагружения. Приведены аналитические выражения, позволяющие оценить среднюю температуру токопровода индуктора.

Технологические процессы, магнитные поля, индукторы, тепловые поля, ресурс, температурные напряжения

Одним из методов высокоскоростного деформирования трубчатых и листовых заготовок является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) с применением импульсных магнитных полей (ИМП) высокой напряжённости.

Магнитно-импульсная штамповка получила большое распространение на предприятиях электротехнической промышленности, общего машиностроения, судостроения и особенно ракетно-космической и авиационной промышленности, где около 75 % всех деталей изготавливается из листов, труб, профилей методами обработки давлением в заготовительно-штамповочных цехах.

Внедрение технологических процессов деформирования заготовок с помощью ИМП обеспечивает требуемую точность и высокое качество деталей при ликвидации ручных и доводочных работ, снижение трудоёмкости работ, улучшает условия труда и культуру производства.

Большое количество работ в области магнитно-импульсной штамповки металлов посвящено исследованию электрических процессов в системе индуктор-заготовка и разработке технологических процессов изготовления деталей с использованием энергии ИМП.

Однако более широкое внедрение МИОМ сдерживается отсутствием исследований по созданию надёжного инструмента

для технологических операций, которым является индуктор.

Технологический ресурс индукторов для некоторых видов операций составляет 5-100 импульсов при достаточно высокой трудоёмкости их изготовления и больших материальных затратах.

Большие возможности метода МИОМ в технологических процессах получения деталей летательных аппаратов вызвали разнообразие создаваемых и существующих конструкций цилиндрических индукторов. Число признаков, по которым они отличаются друг от друга, велико: это конструкция токопровода, форма сечения витка, способ изоляции спирали, форма основания и т. д.

Существуют индукторы двух классов: на обжим и на раздачу. Каждый класс можно разделить на два типа: индукторы с витым и точеным токопроводами. Индукторы с витым токопроводом изготавливаются из медной проволоки прямоугольного сечения, изолированной плёночными диэлектриками. Точеные индукторы включают в себя всю гамму конструкций, рабочий элемент которых изготовлен точением или фрезерованием из пруткового или листового материала. При малых диаметрах обрабатываемых деталей применяют биметаллические токопроводы.

Эксплуатация индукторов в условиях обработки больших партий деталей сопровождается выделением в токопроводе боль-

шого количества тепла от “джоулевого” нагрева материала.

Нагрев материала токопровода индуктора, витковой изоляции и корпусных элементов существенно влияет на эксплуатационные характеристики индукторных систем, а в некоторых случаях - на количество получаемых деталей.

Экспериментальное определение температуры при высокоскоростном деформировании встречает большие трудности. Основная трудность заключается в том, что датчик температуры, находящийся внутри деформируемого металла, должен работать в крайне тяжёлых условиях - при высоких удельных нагрузках, сопровождающихся относительными перемещениями деформируемых объёмов металла. Датчик должен быть практически безынерционным, должен регистрировать изменения температуры, происходящие в малые промежутки времени при скорости изменения температуры порядка сотен градусов в секунду, и не должен влиять на условия деформирования.

Кроме того, в процессе деформирования импульсным магнитным полем в датчиках появляются наводки, которые существенно искажают сигнал и создают большие трудности при расшифровке осциллограмм процесса измерения. Синхронизация процесса разряда батарей конденсаторов установки и запуска измерительной аппаратуры с соответствующей задержкой также весьма затруднена. Были применены методики определения температуры в деформируемом металле в процессе формоизменения с последующим замером конечной температуры заготовки после завершения процесса деформирования, а также методики прямого измерения на основе электронно-оптического преобразователя.

Для определения температуры нагрева токопровода импульсными токами в процессе деформирования использовалась температурная зависимость изменения удельного электросопротивления материала

$$r' = r'_0 (1 + b Q), \quad (1)$$

где r' - удельное электросопротивление материала при измеряемой $T^\circ\text{C}$; r'_0 - удельное

электросопротивление материала при $T=20^\circ\text{C}$; b - температурный коэффициент; Q - тепло, вызвавшее изменение электросопротивления.

Количество тепла, выделившегося в теле при прохождении по нему тока, может быть определено из выражения

$$dQ = j^2 r' dt. \quad (2)$$

Плотность тока в токопроводе индуктора

$$j = \frac{J(t)}{\Delta_i l_3}, \quad (3)$$

где D_i - толщина скин-слоя токопровода; l_3 - длина токопровода; J - интегральный ток, проходящий по индуктору.

Величину скин-слоя можно определить также по формуле

$$\Delta_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0 g f_1}}, \quad (4)$$

где f_1 - частота процессов разряда.

Решая совместно уравнение (3) и (4), получим

$$r' = r'_0 l \frac{br'_0}{\Delta_i^2 l_3^2} \int_0^t J^2(t) dt. \quad (5)$$

При деформировании ИМП ток в индукторе изменяется по закону (рис. 1):

$$J(t) = J_0 e^{-dt} \cdot \sin wt, \quad (6)$$

где J_0 - ток в заготовке при $t = 1/4T$; e^{-dt} - декремент колебаний; T - период разряда батарей конденсаторов; w - частота тока разряда; t - время процесса разряда.

После подстановки и интегрирования получаем

$$r' = r'_0 l \frac{br'_0}{\Delta_i^2 l_3^2} \frac{J_0^2}{(d^2 + w^2)} \left[\frac{w^2}{2d} e^{-2dt} \left(d \sin wt + w \cos wt \sin wt + \frac{w^2}{2d} \right) \right] \quad (7)$$

Учтём, что

$$r' / r'_0 = 1 + \frac{C_n m T^0 b}{V}, \quad (8)$$

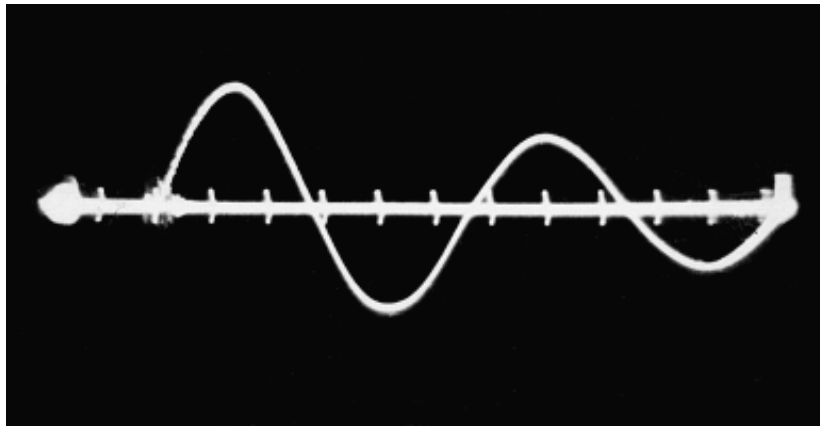


Рис. 1. Оциллограмма тока, снятого в процессе разряда батарей конденсаторов при высокоскоростном деформировании ИМП, $W = 4,8$ кДж

где C_v - теплоёмкость материала токопровода; m - масса токопровода; V - объём; T^0 - температура в токопроводе, вызвавшая изменение удельного электросопротивления. Получим изменение температуры при прохождении вихревых токов по виткам

$$\Delta T^0 = \frac{r' / r_0' - 1}{C_n m b \cdot \frac{1}{V_3}}, \quad (9)$$

где r' / r_0' подсчитывается по формуле (7).

На рис. 2 приведён график изменения температуры токопровода в процессе высокоскоростного деформирования ИМП при

различных величинах энергии, запасаемой в батареях конденсаторов установки. Величина тока J_0 , частота процесса разряда и величина декремента затухания процесса определялись экспериментально по оциллограммам тока, снятым в процессе деформирования.

Из графика видно, что уже при небольших энергиях ($W = 3,3-5,1$ кДж) токопровод нагревается к концу процесса до температуры 100°C . С увеличением энергии происходит более интенсивный нагрев “скин-слоя” токопровода. При больших энергиях ($W = 11,8-20$ кДж) нагрев материала весьма значителен. К 20-й микросекунде токопровод нагревается до температуры свыше 100°C . При этом прочностные свойства материала не

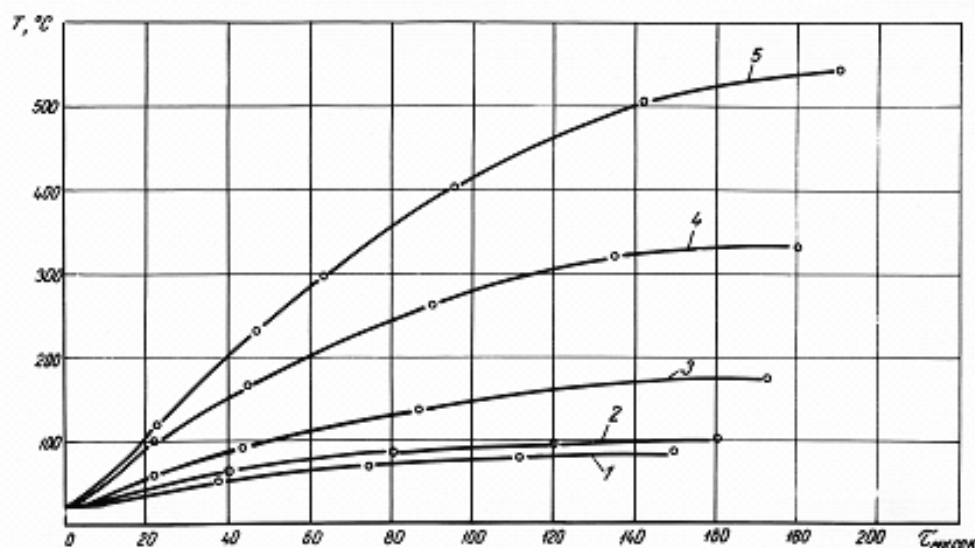


Рис. 2. Изменение температуры скин-слоя токопровода АЕ 75 мм во времени: 1 - $W = 3,3$ кДж, 2 - $W = 5,1$ кДж, 3 - $W = 8,6$ кДж, 4 - $W = 11,8$ кДж, 5 - $W = 20,0$ кДж

снижаются и не повышается его пластичность. К 60-й микросекунде температура повышается до 160-230°C. В результате нагрева происходит значительное снижение прочностных свойств материала. Предел текучести материала σ_T токопровода при этом снижается в 1,3-1,5 раза, предел прочности σ_B - в 1,4-1,7 раза, а пластичность δ увеличивается на 80 % (рис. 3).

Температура к моменту времени процесса формоизменения, равному 20 % от всего времени деформирования, составляет уже 45-50 % от величины конечной температуры. К концу процесса разряда температура в скин-слое токопровода повышается до 300-500°C.

Из анализа графиков можно сделать вывод, что в процессе высокоскоростного деформирования ИМП токопровод в скин-слое нагревается протекающими по ней вихревыми токами до весьма больших температур, зависящих в конечном итоге от величины энергии разряда. Этот нагрев происходит за 160-180 мксек, т.е. процесс нагрева протекает практически адиабатически. Температура в скин-слое к концу процесса деформирования может достигать величины 300-500°C.

Исследование процесса выравнивания температуры по витку можно считать как распределение температуры в однородном цилиндре, который при $t \approx 0$ мгновенно нагревается источником тепла, расположенным на

расстоянии “ r ” от всей цилиндрической плоскости. Это описывается выражением

$$T(r, \tau) = \frac{b}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1^2(\mu_n)} \cdot J_0\left(\mu_n, \frac{r}{R}\right) \times \\ \times J_0\left(\mu_n, \frac{r}{R}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0),$$

где μ_n - корни бесселевой функции первого ряда первого порядка.

При адиабатическом нагреве толсто-стенного цилиндра процесс выравнивания температуры условно можно рассматривать как процесс перераспределения тепла в двух пластинах, одна из которых нагрета до температуры T° , а другая имеет температуру окружающей среды (рис. 4).

Начальные условия:

$$T_{t=0} = T_{0,1} (0 \leq x \leq h_1); T_{t=0} = T_{0,2} (h_1 < x \leq t).$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=t} = 0.$$

Полное перераспределение тепла произойдет при

$$F_0 \frac{at}{b^2} = 0,5,$$

где F_0 - критерий Фурье; t - время выравнивания температуры; b - толщина заготовки;

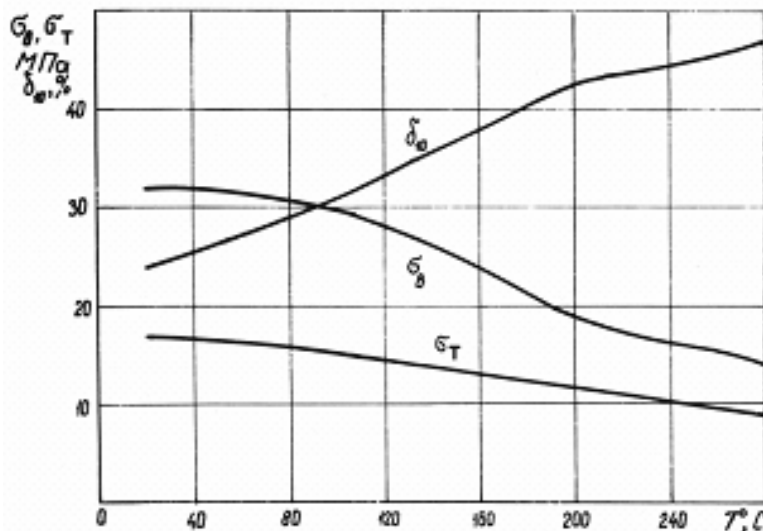


Рис. 3. Изменение механических характеристик медного токопровода в зависимости от температуры

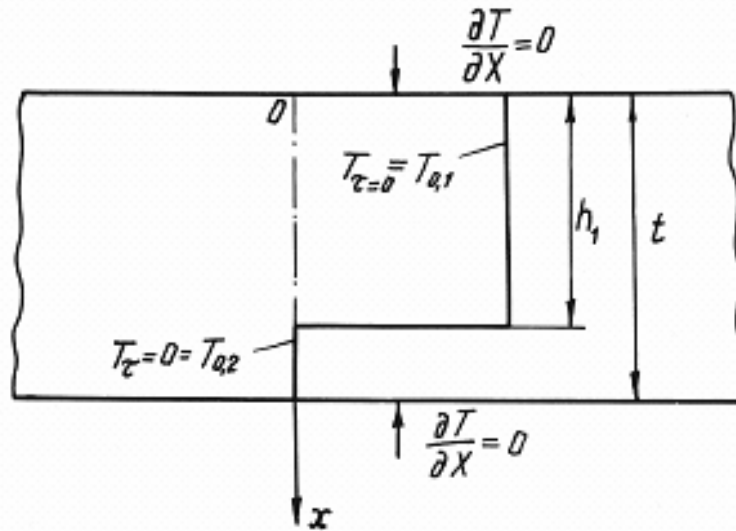


Рис. 4. Тепловая схема, используемая при анализе процесса перераспределения тепла

α - коэффициент температуропроводности материала заготовки.

Для измерения температуры на поверхности витков в экспериментальных исследованиях применялась разработанная измерительная система на электронно-оптическом принципе, схема которого приведена на рис. 5. На поверхности заготовки был закреплён один торец стекловолоконного световода. На торцевую поверхность световода с противоположной стороны был закреплён фотопреобразователь (фотосопротивление из монокристаллического германия ГЭС 40/0,3) с инерционностью до $10 \cdot 10^{-6}$ сек. Осциллограмма мгновенного роста температуры на поверхности детали из материала М1 толщиной $S = 4$ мм для случая процесса калибровки на раздачу приведена на рис. 6. Длительность осциллографированного процесса составляет 160 мксек. Время действия импульса тока разряда порядка 30-32 мксек,

что видно на осциллограмме нижнего луча осциллографа. Из представленных данных видно, что температура на поверхности заготовки растёт до окончания действия тока и сохраняется в течение 25-30 мксек на максимальном уровне. За счёт конвективного и диффузионного теплообмена виден плавный переходный процесс до момента выравнивания температуры по всему объёму витка. Характер изменения температуры в индукторе в зависимости от вида технологической операции приведён на рис. 7-9. Полученные результаты подтверждают правильность выбранных допущений и начальных условий при моделировании процессов.

Разработанная методика позволяет определить температуру в витках индуктора заготовки при магнитно-импульсной штамповке в любой момент времени процесса деформирования.

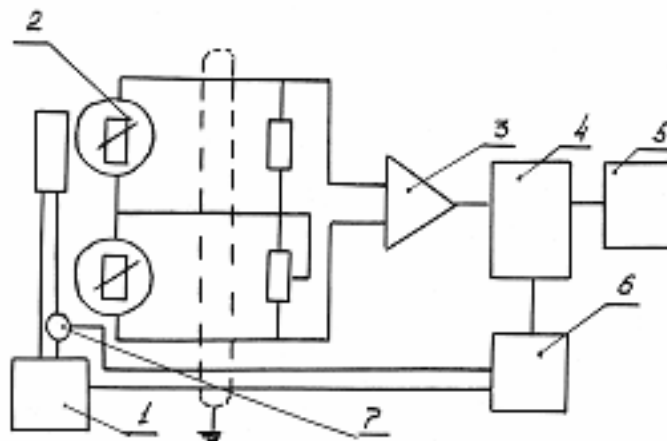


Рис. 5. Принципиальная схема измерительной системы: 1 - МИУ, 2 - фотосопротивление, 3 - интегратор, 4 - осциллограф, 5 - блок синхронизации, 6 - блок запуска, 7 - датчик тока

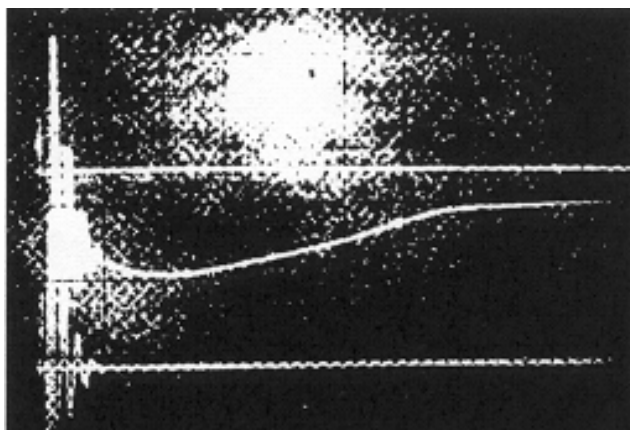


Рис. 6. Осциллограмма сигнала, полученного при измерении температуры оптоэлектронным методом

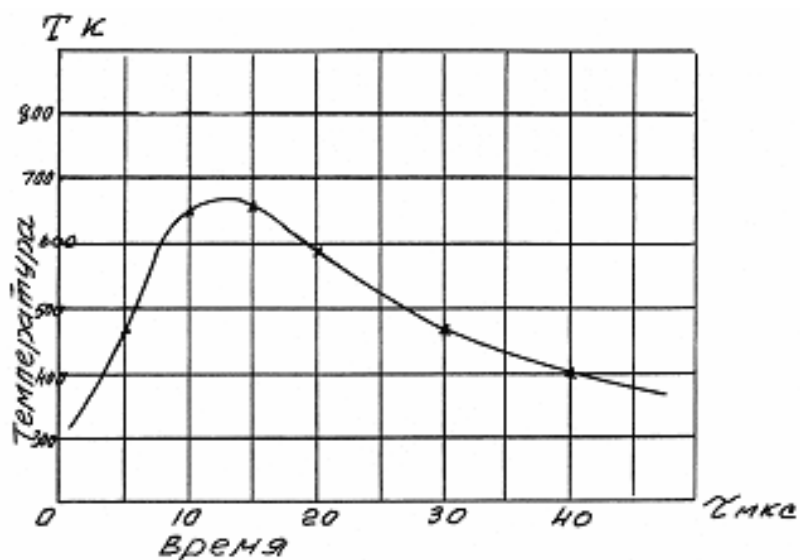


Рис. 7. Характер изменения температуры в витке при формовке деталей на низкочастотных установках

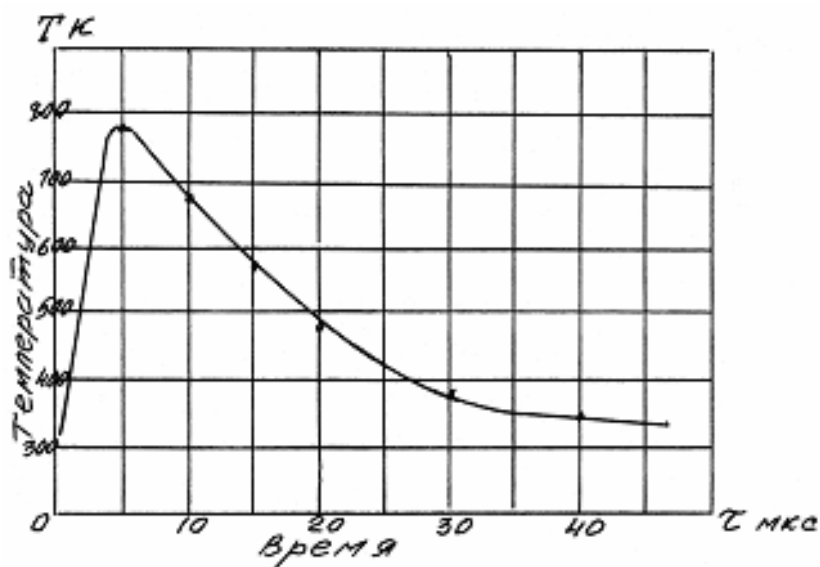


Рис. 8. Характер изменения температуры в витке при обработке на высокочастотной установке

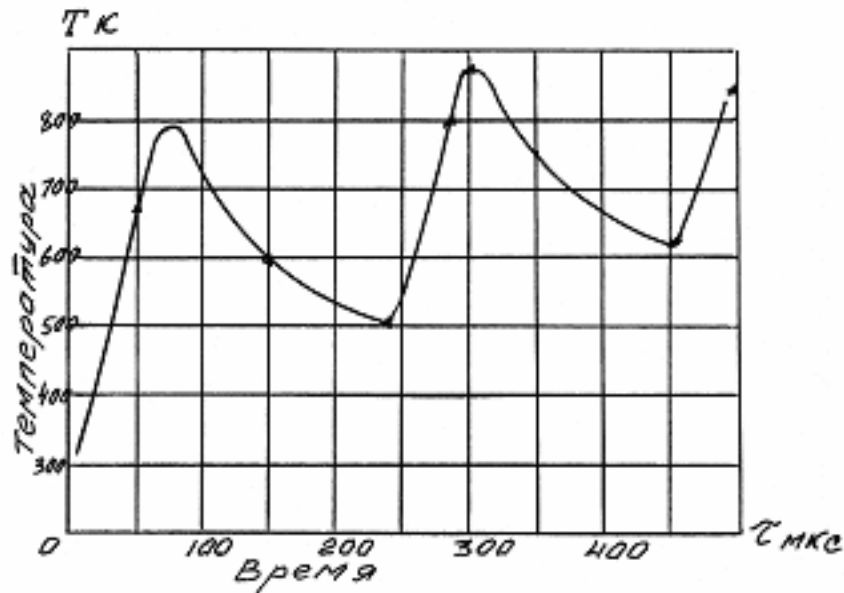


Рис. 9. Характер изменения температуры в витке при многократном нагружении

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THERMAL FIELDS IN INDUCTOR SYSTEM UNDER MAGNETIC PULSE FORMING

© 2008 V. A. Barvinok¹, Yu. Ye. Palamartchuk², A. N. Kirilin²,
V. P. Samokhvalov¹, V. M. Vershigorov²

¹Samara State Aerospace University

²Central Design Bureau "Progress"

The paper describes the basic classes of inductor systems used in magnetic pulse forming. Factors having effect on the service properties of the construction are noted. The basic modes of inductor system operation are discussed: at high-frequency and low-frequency installations and in the multicycle loading mode. Analytical expressions are given that make it possible to determine the average temperature of a current-conducting inductor.

Technological processes, magnetic fields, inductors, thermal fields, resource, temperature stresses

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НИИ технологий и проблем качества, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Область научных интересов: физика и математическое моделирование тепловых и деформационных процессов в твёрдых телах, разработка физических и математических моделей процессов взаимодействия ускоренных потоков плазмы с твёрдым телом.

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Кирилин Александр Николаевич, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Самохвалов Владимир Петрович, доцент, СГАУ, доктор технических наук, профессор.

Вершигоров Вячеслав Михайлович, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Barvinok, Vitaly Alexyevitch, Doctor of Technical Science, professor, Correspondence Member of the Russian Academy of Sciences. Director of Research Institute of technologies and quality problems, Head of the Department of aircraft construction and quality management in mechanical engineering. Area of research: physics and mathematical modeling of thermal and deformation processes in solids, developing physical and mathematical models of processes of interaction between accelerated plasma flows and a solid body.

Palamartchuk, Yuri Yefimovitch, head of department, Central Design Bureau “Progress”.

Kirilin, Alexander Nikolayevitch, general director, doctor of Technical Science, professor, Central Design Bureau “Progress”.

Samokhvalov, Vladimir Petrovitch, Associate Professor, SSAU, Doctor of Technical Science, professor.

Vershigorov, Vyacheslav Mikhailovitch, Deputy General Director for General Matters, Central Design Bureau “Progress”.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ

© 2008 С. В. Белокуров

Воронежский институт МВД России

Рассмотрены вопросы построения моделей кольцевых маршрутных сетей с учётом специфики городского пассажирского транспорта (ГПТ).

Городской пассажирский транспорт, кольцевые маршруты, моделирование

Кольцевые маршруты являются наиболее важными маршрутами в социально-экономической системе пассажирских перевозок. Несмотря на то, что они заранее имеют низкий коэффициент прямолинейности, сложности в организации межрейсового отдыха и часто не отвечают условию кратчайшего пути, эти маршруты очень удобны для пассажиров, поскольку в определённых ситуациях они имеют возможность осуществить корреспонденцию в любом из направлений. Кроме того, при правильной организации кольцевых маршрутов их эффективность выше большинства маятниковых маршрутов, что подтверждают проведённые исследования [1-6].

Формирование множества кольцевых маршрутов m_k можно осуществить за несколько этапов (для каждого скоростного маршрутного коридора и вида транспорта) с использованием процедур теории графов. Для этого, в первую очередь, во всех подграфах $G_m(V_m, D_m)$ (далее G_m) графа $G_K(V, D)$ осуществляется проверка наличия линий сообщения тем видам транспорта, которым они принадлежат. Расчёт осуществляется для каждого подграфа G_m с учётом введённых на него ограничений.

Этап первый. Осуществление процедуры поиска гамильтоновых циклов в G_m с использованием среднесуточной матрицы пассажирских корреспонденций и на основе метода перебора Робертса-Флореса и мультицепного метода Г. Селби.

Цикл графа называется гамильтоновым, когда он проходит через каждую вершину гамильтоновой цепи. Гамильтонова цепь гра-

фа – простая цепь, проходящая через каждую вершину графа точно один раз. Граф называется гамильтоновым, если он обладает гамильтоновым циклом.

Метод перебора Робертса-Флореса основан на формировании одной гамильтоновой цепи, непрерывно продлеваемой до момента получения гамильтонова цикла или получения информации, что такой цикл в графе G_m отсутствует. В последнем случае цепь модифицируется некоторым систематическим способом, после чего продолжается поиск гамильтонова цикла. Сложность метода здесь $O(n^4)$.

Расчёт по данному методу начинается с построения матрицы $M = \|v_{ij}\|$, где элемент v_{ij} – некоторая i -я вершина, для которой в графе G_m существует дуга (j, i) . Обозначим вершину i через x_i , а вершину j через x_j . Тогда в графе $G_m(V_m, D_m)$ существует множество $D_m(x_j)$, в котором вершины x_i можно упорядочить произвольно в столбце j матрицы M . При этом число строк k соответствует наибольшей полустепени исхода вершины.

Первоначально выбирается некоторая начальная вершина x_r , которая образует элемент множества S . Это множество сохраняет найденные вершины строящейся цепи. К S добавляется первая возможная вершина a (возможная, поскольку она ещё не принадлежит S) в столбце x_r , затем первая возможная вершина b в столбце a , потом первая возможная вершина c в столбце b и т.д. На некотором шаге r возникает одна из двух причин, по которой некоторая вершина не может быть включена в $S = \{x_1, a, b, c, \dots, x_{r-1}, x_r\}$:

1) в столбце x_r нет возможной вершины;

2) цепь, определяемая последовательностью вершин в S , имеет длину $n-1$, т.е. является гамильтоновой цепью.

Для более полного приближения рассматриваемого метода к построению кольцевых маршрутов модернизируем предложенный алгоритм, введя дополнительное условие.

В основе построения гамильтоновой цепи должна лежать матрица среднесуточных пассажирских корреспонденций $\|x_{ij}^{cc}\|$, формирующая граф G_m . Поскольку кольцевой маршрут рационально применять на основных корреспондирующих направлениях, при переходе от некоторой вершины a к некоторой вершине b в S в процессе построения цикла преимущество выбора того или иного направления отдаётся той из вершин b , корреспонденции пассажиров в которую будут максимальны, т.е. $(a_i, b_j) \rightarrow \max$.

В случае 2 в G_m или оказывается сформированным гамильтонов цикл, поскольку существует дуга (x_r, x_l) , или гамильтонов цикл отсутствует вследствие отсутствия такой дуги. В случае нахождения гамильтонова цикла результат сохраняется, а расчёт производится заново. При этом последняя включённая вершина x_r удаляется из S , формируя множество $S = \{x_l, a, b, c, \dots, x_{r-1}\}$ и добавляя к этому множеству первую возможную вершину, следующую за x_r в столбце x_{r-1} матрицы M . Затем выполняются следующие итерации до тех пор, пока в S остаётся единственная вершина x_l и считается, что все гамильтоновы циклы в графе G_m найдены.

На некотором этапе построенная цепь задается множеством $S = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ и следующей вершиной, которую предполагается добавить к S ($x' \in S$). Эта вершина является изолированной в подграфе графа G_m , остающемся после удаления всех вершин, образующих построенную ранее цепь, и возникают две ситуации.

а) Если

$$\exists x \in X - S \mid x \in D(x_r), D^{-1}(x) \subseteq S,$$

то, добавляя к S любую вершину $x' \neq x$, невозможно достичь из какой-либо конечной вершины построенной цепи вершины x . Следовательно, гамильтонов цикл недостижим, а x является единственной вершиной, которую можно добавить к S для продолжения цепи.

б) Если

$\exists x \in X - S \mid x \in D^{-1}(x_l), D(x) \subset S \cup \{x'\} \forall x'$, то x' не может быть добавлена к S , поскольку в остающемся подграфе не может существовать никакой цепи между x и x_l . При этом цепь, определяемая множеством $S \cup \{x'\}$, не может привести к гамильтонову циклу, а в качестве кандидата на добавление к множеству S следует рассмотреть другую вершину, отличную от x' .

Метод нахождения гамильтоновых циклов в графе G_m Робертса-Флореса недостаточно полно рассматривает оставшуюся часть графа. Данную проблему решает применение мультицепного метода, позволяющего достичь сложности этих двух методов менее $O(n^3)$.

Мультицепной метод заключается в следующем. Пусть на некотором этапе поиска сформирована цепь S_0 и возможны цепи S_1, S_2, \dots . Выбирается некоторая некрайняя вершина, и поскольку она включена в цепь с помощью двух дуг, очевидно, что все другие дуги этой вершины могут не рассматриваться и могут быть удалены из G_m .

Для любой начальной вершины цепи можно удалить все дуги, исходящие из неё, а для конечной – все дуги, оканчивающиеся в ней. Во всех случаях, если существует более одной гамильтоновой цепи S_0 , проходящей через все вершины G_m , любая имеющаяся дуга, ведущая из конца любой цепи в начальную вершину этой же цепи, может быть удалена, т.к. такая дуга замыкает негамильтоновы циклы.

В результате удаления всех этих дуг формируется граф, не включающий крайние вершины цепей, в которых удаляются все вершины и дуги, инцидентные им из графа G_m , заменяя все их единственной дугой. Таким образом, формируется редуцированный граф G_k (k – индекс номера шага поиска).

Продолжение цепи S_0 возможно за счёт добавления вершины x_j (возможной в смысле алгоритма Робертса-Флореса) такой, что в G_k существует дуга, исходящая из конечной вершины S_0 (обозначим: $e(S_0)$) и входящая в вершину x_j .

Добавление x_j к S_0 осуществляется следующим образом.

1) Первоначально из G_k удаляются все необходимые дуги:

- все дуги, оканчивающиеся в x_j или исходящие из $e(S_0)$, за исключением дуги $(e(S_0), x_j)$;

- все дуги, исходящие из x_j в начальную вершину пути S_0 ;

- если x_j оказывается начальной вершиной другой цепи S_j , то следует удалить также любую дугу, ведущую из конечной вершины цепи S_j в начальную вершину цепи S_0 .

2) Обозначим граф после удаления всех дуг через G_k^- . Если $\exists x \in G_k^- \mid x \notin S_0, S_1, \dots$, в смысле конечной вершины и после удаления имеет полустепень захода $|D_k^{-1}(x)| = 1$, то исключаются все дуги, исходящие из вершины $v = D_k^{-1}(x)$, за исключением дуги (v, x) .

Далее, если $\exists x \in G_k^-$, не являющаяся начальной ни для какой цепи и имеющая после удаления дуг полустепень исхода $|D_k(x)| = 1$, то исключаются все дуги, исходящие из x , кроме дуги $(x, D_k(x))$. После этого производится перестроение всех цепей с удалением всех дуг, ведущих из конечных в начальные вершины. Шаг 2 повторяется до тех пор, пока существует возможность удалять дуги.

3) Из оставшегося графа G_k^- исключаются все вершины, полустепени захода и исхода которых $|D_k(x)| = 1$. В результате получается новый редуцированный граф G_{k+1} , заменяющий предыдущий граф G_k . Производится возврат к шагу 1.

Этап второй. На основе множества сформированных гамильтоновых циклов, учитывающих среднесуточные корреспонденции пассажиров между ij -ми остановочными пунктами (ОП), необходимо ранжиро-

вать все их по возрастанию среднесуточной пассажиронапряжённости. Для этого используем метод пирамидальной сортировки (алгоритм Уильямса и Флойда) как один из наиболее эффективных методов сложностью $O(n \log n)$. Пирамида – бинарное дерево высотой k , в котором все узлы имеют глубину k или $k-1$. При этом уровень $k-1$ заполнен полностью, а уровень k заполнен слева направо. Она обладает свойством: каждый элемент пирамиды меньше или равен его родителю. Таким образом, формируется последовательность элементов

$$a[0], a[1], a[2], \dots, a[k] \mid a[i] \leftarrow a[2i], a[i] \leftarrow a[2i+1] \quad \forall i = \overline{0, k/2}$$

Алгоритм пирамидальной сортировки заключается в том, что элементы некоторого массива a образуют пирамиду, если для всех значений i выполняются условия:

$$a[i] \leftarrow a[2i] \text{ и } a[i] \leftarrow a[2i+1].$$

Начать построение пирамиды можно с $a[k] \dots a[n]$, $k = [size/2]$. Эта часть массива удовлетворяет свойству пирамиды, так как не существует таких индексов i, j , при которых $i = 2i + 1$ (или $j = 2i + 2$) просто потому, что такие i, j находятся за пределами рассматриваемого массива.

Чтобы при добавлении элемента сохранялась пирамидальность, используется процедура расширения пирамиды $a[i+1] \dots a[n]$ на элемент $a[i]$ со смещением влево:

а) новый элемент $a[i]$ помещается в вершину дерева;

б) из листьев слева $a[2i+1]$ и справа $a[2i+2]$ выбирается лист с наибольшим значением;

в) если этот элемент больше $a[i]$, производится замена местами этого элемента с $a[i]$ и возвращение к шагу б).

Если шаг в) не выполняется, то сортировка считается завершённой.

Этап третий. После этапа ранжирования выбирается маршрут m_{max} с максимальными корреспонденциями, на основе которого и подбираются все кольцевые маршруты, смежные хотя бы одним ребром с m_{max} .

Маршрут m_{max} является вершиной сформированной пирамиды, а смежные с ним маршруты определяются на основании принад-

лежности m_{max} корреспонденций между пунктами ij . Поиск таких циклов можно осуществить, используя процедуру поиска в глубину для каждого из рёбер маршрута m_{max} .

Эту процедуру можно значительно упростить, поскольку все гамильтоновы циклы, составляющие контуры пассажирских корреспонденций маршрутов, определены. Следовательно, каждый из таких циклов содержит информацию о направлении корреспонденций и информацию о смежности вершин ij . Для решения поставленной задачи следует на основании сформированной пирамиды маршрутов и данных о смежности вершин m_{max} поочерёдно определить всю совокупность смежных рёбер маршрутов с маршрутом m_{max} .

Если хотя бы одно ребро маршрута m_i соответствует одному из рёбер m_{max} , то этот цикл обозначается пометкой, формируя некоторый массив M . На основании M производится новая пирамидальная сортировка.

Этап четвёртый. Исследование и включение в циклы конечных пунктов производится на основании матриц $\|v_{\bar{e}i}\|$ и $\|l_{ij}^a\|$. Используя матрицу $\|v_{\bar{e}i}\|$, определяем, какое количество выделенных вершин циклов является конечными пунктами. В случае, если ни одна из вершин не является конечным пунктом, используя процедуру поиска в графе G_m , к совокупности полученных вершин добавляем одну или две вершины при условии их равной удалённости друг от друга и максимального приближения к вершинам цикла.

Таким образом, в каждом цикле должна присутствовать хотя бы одна вершина, являющаяся конечным пунктом. Если такая вершина отсутствует, то применяется многоитерационная процедура нахождения кратчайших путей между всеми парами вершин с использованием алгоритма Флойда, имеющего сложность $O(n^3)$.

Для расчёта используется множество вершин циклов m_i , а в качестве вершин назначения граф $G_v(V, D, l_{ij}^a)$, сформированный на схеме управления дорожной сетью (УДС), где в качестве вершин отмечены только вершины $v_{\bar{e}i}$. Включение в цикл конечного пункта

происходит следующим образом. На основании сформированной на втором этапе пирамиды в граф G_v поочерёдно включаются полученные ранее гамильтоновы циклы. После включения цикла m_i производится определение кратчайших расстояний.

Пусть граф $G_v = (V, D, l_{ij}^a)$ задан матрицей весов L , где $L[i, j] = l_{ij}^a(v_i, v_j)$, и $L[i, j] = \infty$ (в программной реализации заменяется очень большим числом), если дуги (v_i, v_j) в сети нет. Обозначим через $l_k(i, j)$ длину кратчайшего пути из v_i в v_j , все промежуточные вершины которого содержатся во множестве $\overline{v_1, v_k}$, т.е. содержатся в первых k вершинах. Предполагается, что $l_0(i, j) = L[i, j]$. Пусть $l_k(i, j)$ вычислено при всех $i, j = \overline{1, n}$ и некотором $k \geq 0$. Тогда справедливо равенство

$$l_{k+1}(i, j) = \min(l_k(i, j), l_k(i, k+1) + l_k(k+1, j)). \quad (1)$$

Равенство (1) позволяет легко находить расстояния между всеми парами вершин. Для этого нужно последовательно вычислить для всех пар вершин значения $l_0(i, j)$, $l_1(i, j)$, ..., $l_n(i, j)$ и учесть, что расстояние от v_i до v_j равно $l_n(i, j)$.

После выполнения этой процедуры из всей совокупности кратчайших расстояний необходимо оставить только те из них, у которых вершины цикла m_n и графа G_v являются инцидентными.

Следующим действием является временное добавление к системе весов матрицы пассажирских корреспонденций Q_{ij} , и из всей совокупности кратчайших путей выбирается тот, который соответствует условию

$$l_{ij} \rightarrow \min; \quad Q_{ij} \rightarrow \max$$

или

$$\frac{Q_{ij}}{l_{ij}} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Условием (2) определяется возможная выгода от взаимодействия рассматриваемого конечного пункта с циклом m_n .

Полученный таким образом конечный пункт включается в цикл. Формируется шаблонный граф G_v , в котором вес рёбер цикла снова соответствует $G_v = (V, D, l_{ij}^a)$. Из него исключаются все вершины, инцидентные ближайшей к найденному конечному пункту, кроме него самого, на расстоянии $l_m / 3$ в каждую сторону от конечного пункта. Это условие обусловлено необходимостью максимально допустимого отдаления двух конечных пунктов друг от друга.

С учётом образованной цепи ей возвращаются исходные веса, соответствующие величине пассажирских корреспонденций с учётом усечённого цикла m_n до некоторой цепи, и повторяется алгоритм Флойда. По завершении алгоритма на основании (2) определяется второй конечный пункт цикла при условии

$$\frac{Q_{ij}}{l_{ij}} \rightarrow \max; \quad l_{\bar{e}i_1 - \bar{e}i_2} \rightarrow \max. \quad (3)$$

После этого производится возврат к исходному циклу m_n графа G_m с добавлением в него двух дополнительных вершин: двух конечных пунктов маршрута.

Этап пятый. Для всех найденных маршрутов, включая m_{max} , производится расчёт нахождения кратчайших маршрутов на УДС города между всеми вершинами цикла m_{max} в период максимального пассажиропотока. Для этого используем граф G_m , множество вершин m_{max} , включая конечные пункты, матрицы $\| [n] \|$, $\| x_{ij}^{cc} \|$ и $\| l_{ij} \|$.

Поскольку граф G_m рассматривается для каждого вида и типа транспортных средств, при формировании ограничений существует возможность перейти от $[n]$ к $[Q]$. Среднечасовую величину $[Q]$ можно определить как

$$[Q] = [n] \cdot q_n, \quad (4)$$

где $[n]$ – ограничения по транспортной вместимости ОП для k -го скоростного транспортного коридора; q_n – вместимость транспортного средства рассматриваемого типа.

Количество поступающего транспорта на ОП напрямую зависит от времени посад-

ки-высадки пассажиров, а следовательно, от допустимого интервала поступления транспорта на ОП. Принимается допустимый интервал поступления транспорта на ОП в период максимального пассажиропотока: $J_{min} = 1$ мин, $J_{max} = 4$ мин, т. е. вводится ограничение вида

$$J_{min} \leq J_i \leq J_{max}. \quad (5)$$

Поскольку

$$J_i = \frac{DT_{ii}}{n} \Rightarrow [n] = \frac{DT_{ii}}{J_i}, \quad (6)$$

где J_i – интервал поступления транспорта на i -й ОП; DT_{mm} – период устойчивого пассажиропотока.

Тогда допустимое ограничение по величине пассажиропотока через i -й ОП с учётом (4) и (6) составит

$$[Q] = \frac{60 \cdot \Delta T_{ii} \cdot q_n}{J_i}. \quad (7)$$

С учётом условия (5) имеем:

$$Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{max}.$$

Следует также учесть, что для неосновных маршрутов данное условие сохраняется в нижней части ограничения, т.е. $Q_{min} \leq Q_i$. Верхнее ограничение может быть задано экспертом, исходя из целесообразности.

Определив пропускную способность всех ОП, можно переходить непосредственно к построению маршрута. Для этого используем задачу определения потока минимальной стоимости. Введём важное допущение: степень вершин в кольцевом маршруте составляет $k = 2$, то есть имеется возможность объединить i -ю вершину с ij -м перегонном. Такой смежный участок обладает пропускной способностью Q_i и весом t_c , который обозначает время посадки-высадки пассажиров на i -м ОП и время осуществления корреспонденции пассажиров от i -го ОП к j -му. С учётом введенных ограничений используем УДС и рассматриваем каждую смежную вершину как двудольный граф (рис. 1), когда он не со-

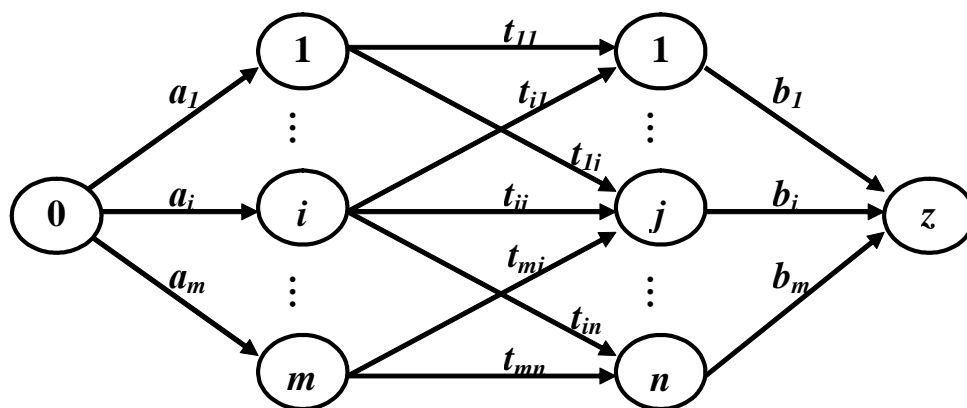


Рис. 1. Общий вид двудольного графа

держит циклов нечётной длины или когда в нём все простые циклы имеют чётную длину (теорема Кернига). Вершины графа представляют истоки m и стоки n . Истоки m обладают некоторым объёмом корреспонденций $\dot{a}_i, i = \overline{1, m}$, требуемых для перемещения в стоки n , принимающие эти корреспонденции в объёме $b_i, i = \overline{1, n}$. Известны затраты времени t_{ij} на корреспонденцию пассажиров от i -го ОП к j -му.

Вводится предположение о замкнутости задачи

$$\sum_{i=1}^m \dot{a}_i = \sum_{i=1}^n b_i. \quad (8)$$

К двудольному графу (рис. 1) добавляются вход 0 и выход z , смежные вершинам определённого ранее гамильтонова цикла. Соединяя их с остальными дугами, обладающими потоком

$$x_{0i} = a_i, i = \overline{1, m}, x_{jz} = b_j, j = \overline{1, n},$$

можно сформулировать задачу о потоке минимальной стоимости. Её математическая интерпретация имеет вид

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} t_{ij} \rightarrow \min, \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = \overline{1, m}, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = \overline{1, n}, \\ x_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Решение задачи возможно за счёт использования алгоритма выявления отрицательных циклов. Пусть в графе существует допустимый поток i со значением v и величина его известна. Такой поток может быть получен с помощью алгоритма максимального потока (от s к t) и добавления потока общей величины $d(t)$ на всех аргументальных цепях до тех пор, пока поток f_{st} не достигнет значения v , которое по условию меньше значения максимального потока.

Для этого допустимого потока определяется новый инкрементальный граф

$$G^m(x) = (X^m, A^m).$$

Для каждой дуги $(x_i^m, x_j^m) \in A_1^m$ положим $t_{ij}^m = t_{ij}$. Для каждой дуги $(x_j^m, x_i^m) \in A_2^m$ положим $t_{ji}^m = -t_{ij}$. Новый граф $G^m(x)$ даёт инкрементальные пропускные способности и стоимости (относительно начального потока x) любого дополнительного потока, введённого в G . Алгоритм основан на следующей теореме.

Теорема. Поток x будет потоком минимальной стоимости со значением v тогда и только тогда, когда в $G^m(x)$ не существует никакого цикла Φ , сумма стоимости дуг которого отрицательна.

В соответствии с этой теоремой всё, что требуется для нахождения потока минимальной стоимости со значением v , это начать с допустимого потока x со значением v , пост-

роить граф $G^m(x)$ и проверить, нет ли в нём циклов с отрицательной стоимостью, используя любой из алгоритмов нахождения кратчайшей цепи. Если не существует никакого цикла с отрицательной стоимостью, то поток будет потоком минимальной стоимости. Если цикл Φ с отрицательной стоимостью существует, то надо направить по нему поток с максимально возможным значением d . Суммарный поток от s к t не изменит своего значения v , а его стоимость уменьшится на $d \cdot t(\hat{O})$, где $t(\Phi)$ – величина стоимости отрицательного цикла. Очевидно, d должно быть выбрано так, чтобы пропускные способности дуг в $G^m(x)$ не превышались:

$$d = \min_{(x_i^m, x_j^m) \in \hat{O}} [Q_{ij}^m]. \quad (10)$$

Если этот поток d наложить на поток x в графе G , то, в силу первоначального выбора пропускных способностей дуг в $G^m(x)$, результирующий поток всё ещё будет допустимым. Процесс можно повторять, начиная его с полученного нового потока x , строя новый граф $G^m(x)$ относительно нового потока и выявляя в этом графе циклы с отрицательной стоимостью.

Этап шестой. На основании результатов построения совокупности кольцевых маршрутов производится расчет основных показателей с учётом двунаправленности каждого кольцевого маршрута и производится выбор наиболее эффективного m , из них. Для этого используем основные показатели при выявлении основных факторов, влияющих на эффективность ГПТ.

Поскольку маршруты являются сформированными как по корреспонденциям пассажиров, так и по размещению их на маршрутной сети, в первую очередь определяются основные маршрутные показатели для каждого из направлений за период максимального пассажиропотока: протяжённость маршрута l_m ; время выполнения рейса t_p ; общий объём пассажирских корреспонденций ΣQ_{ij} ; максимальный пассажиропоток по каж-

дому перегону Q_m^{max} ; максимальный пассажиропоток на маршруте ΣQ_m^{max} ; необходимое количество транспорта на линии n_m .

Далее определяются: среднее расстояние ездки пассажира l_{en} ; коэффициент наполнения транспорта γ в «пиковый» период; коэффициент неравномерности пассажиропотока по длине маршрута в период максимального пассажиропотока; среднесуточный коэффициент неравномерности пассажиропотока.

После определения всех показателей производится выбор наиболее рационального маршрута. При этом, поскольку многофакторная задача крайне усложняет этот процесс, используем показатели, которые в наибольшей степени затрагивают социальную и экономическую составляющие пассажирских перевозок.

На предыдущем этапе, по сути, область поиска была сужена с учётом допустимости количества транспорта n_m , пропускной способности ОП, максимального обеспечения пассажирских корреспонденций Q_{ij} и минимизации времени, затрачиваемого пассажирами на осуществление корреспонденций. Следовательно, по каждому из рассматриваемых маршрутов социальная составляющая обеспечена, как минимум, удовлетворительно. Задача упрощается, и в качестве основного критерия оптимальности между совокупностью рассматриваемых маршрутов может выступить приведенная часовая производительность по каждому из маршрутов

$$W_m = \frac{\sum Q_{ij} \cdot l_{ij}}{DT_{\hat{O}} \cdot l_m} \quad | \quad W_m \rightarrow \max, \quad (11)$$

где $\sum Q_{ij} \cdot l_{ij}$ – пассажирооборот маршрута m ; $DT_{\hat{O}}$ – суточная продолжительность работы маршрута; l_m – протяжённость маршрута; Q_{ij} – корреспонденции пассажиров по кратчайшему пути из пункта i в пункт j ; l_{ij} – расстояние ездки пассажира при осуществлении корреспонденции Q_{ij} . Формула (11) представляет собой плановый пассажирооборот, приходящийся на один километр маршрута и обеспеченный за период его работы. Необходи-

мость введения приведённой производительности связана с тем, что протяжённость всех маршрутов различна. Следовательно, в результате нахождения маршрута согласно (11) наиболее эффективным будет маршрут $m_i(W_m^{\max}) = m_y$.

Этап седьмой. Выбранный маршрут m_y включается в схему УДС города и предлагается к рассмотрению эксперту с рекомендацией принятия маршрута. Если маршрут принимается экспертом, то из графа G_m исключается весь объём корреспонденций, обслуживаемых выбранным маршрутом m_y , из матриц пропускной способности ОП $\| [n] \|$, средних несучетных корреспонденций $\| x_{ij}^{\tilde{m}} \|$ и корреспонденций периода устойчивого пассажиропотока $\| x_{ij}^{Dr} \|$. Из рассмотрения исключается всё множество кольцевых маршрутов, не отвечающих допустимой величине коэффициента смежности: $m_{cm} \leq [m_{cm}]$. Коэффициент смежности представляет собой процентное соотношение допустимой протяжённости смежных рёбер сравниваемых маршрутов и рассчитывается как

$$[m_{\tilde{m}}] = \frac{\hat{E}_{\tilde{m}} \cdot l_r \cdot 100}{l_m}, \% \quad (12)$$

Величина $[m_{cm}]$ определяется исходя из среднестатистических величин, определённых обследованиями: средней величины смежности участков маршрутов $K_{cm} = 5$ шт., средней протяжённости перегонов $l_n = 0.59$ км и средней протяжённости маршрутов $l_m = 30$ км. Таким образом, $[m_{cm}] = 5 \cdot 0.59 \cdot 100 / 30 \approx 10,0 \% (m_{cm} \leq 10 \%)$.

В заключение маршруту m_y присваивается собственный номер, и он считается утверждённым на данном этапе проектирования единой маршрутной сети (ЕМС).

В случае отрицательного решения эксперта маршрут m_y исключается из рассмотрения. Происходит возвращение ко всем маршрутам, смежным m_{max} , производится выбор из них следующего, наиболее эффективного m_y , который и предоставляется эксперту для рассмотрения.

Этап восьмой. После утверждения маршрута в ЕМС производится возвращение ко второму этапу. Процесс продолжается с той разницей, что на седьмом этапе эксперту для принятия решения предлагается схема каждого формируемого маршрута совместно с теми маршрутами, которые уже включены в маршрутную схему.

Расчёт завершается в случае:

- если рассмотрены все варианты построения кольцевых маршрутов;
- оставшиеся кольцевые маршруты не обладают весомым пассажиропотоком.

После завершения расчётов получается сформированная часть ЕМС, состоящая из совокупности кольцевых маршрутов для каждого вида транспорта. По результатам расчётов часть пассажиропотока, которая обслуживается кольцевыми маршрутами, исключается из графа G , равно как и снижаются пропускные способности некоторых оставшихся пунктов.

Библиографический список

1. Белокуров, С. В. Модели выбора недоминируемых вариантов в численных схемах многокритериальной оптимизации [Текст] / С. В. Белокуров, Ю. С. Сербулов, Ю. В. Бугаев. - Воронеж: Издательство "Научная книга", 2005. - 199 с.
2. Белокуров, С. В. Синтез функций выбора на итерациях поиска в численных моделях многокритериальной оптимизации [Текст] / С. В. Белокуров, С. В. Величко, Д. Е. Соловей. - Воронеж: Воронежский гос. университет, 2004. - 96 с.
3. Белокуров, С. В. Модели выбора в задачах многокритериальной оптимизации [Текст] / С. В. Белокуров, А. В. Заряев // Применение информационных технологий для решения прикладных задач: Межвузовский сб. науч. тр. - Воронеж: ВИ МВД России, 2002. - С. 47-49.
4. Белокуров, С. В. Классификация ситуаций выбора и анализ способов формализации численных векторных схем [Текст] / С. В. Белокуров, В. В. Сысоев // Компьютерные технологии автоматизированного проектирования систем машиностроения и аэрокосмической техники: Сб. науч. тр. - Воронеж, ВГТУ, 2002. - С. 38-42.

5. Белокуров, С. В. Задача выбора оптимальных вариантов на основе вероятностного подхода [Текст] / С. В. Белокуров, В. И. Сумин, М. В. Питолин и др. // Вестник ВГТУ. - Сер. Радиоэлектроника и системы связи. - 2006. - № 7. - С. 59-62.

6. Белокуров, С. В. Математические модели в условиях динамики рыночной транспортной среды [Текст] / С. В. Белокуров, А. В. Кононова // Экономика и производство. - 2007. - № 1. - С. 20-23.

References

1. Belokurov, S. V. Models of choosing undominated variants in numerical schemes of multicriterial optimization / S. V. Belokurov, Yu. S. Serbulov, Yu. V. Bugayev – Voronezh: Publishing House “Nautchnaya kniga” 2005 – 199 pp.

2. Belokurov, S. V. Synthesis of choice functions on search iterations in numerical models of multicriterial optimization / S. V. Belokurov, S. V. Velitchko, D. Ye. Solovey. – Voronezh: Voronezh State University. – 2004. 96 pp.

3. Belokurov, S. V. Models of choice in the problems of multicriterial optimization / S. V. Belokurov, A. V. Zaryayev // Using information technologies for solving applied problems: Interuniversity collection of transactions – Voronezh: Voronezh Institute of Ministry of Foreign Affairs of Russia, 2002 – pp. 47-49.

4. Belokurov, S. V. Classification of choice situations and analysis of ways of numerical vector scheme formalization / S. V. Belokurov, V. V. Sysoyev // Computer technologies of automatic design of machine building systems and aerospace equipment. Collection of transactions. – Voronezh, Voronezh State Technical University, 2002 – pp. 38-42.

5. Belokurov, S. V. Problem of choosing optimal variants on the basis of the probability approach / S. V. Belokurov, V. I. Sumin, M. V. Pitolin et al. // Vestnik of Voronezh State Technical University. – Series: Radioelectronics and communication systems. – 2006 – No. 7 – pp. 59-62.

6. Belokurov, S. V. Mathematical models in the context of market transport environment dynamics / S. V. Belokurov, A. V. Kononova // Ekonomika i proizvodstvo (Economy and production) – 2007 – No. 1. – pp. 20-23.

MODELLING OF A MUNICIPAL TRANSPORT ROUTE NETWORK

© 2008 S. V. Belokurov

Voronezh Institute of Ministry of Internal Affairs of Russia

The paper deals with the problem of constructing models of circular route networks tasking account of the specificity of municipal passenger transport.

Municipal passenger transport, circular routes, modeling

Информация об авторе

Белокуров Сергей Владимирович, преподаватель кафедры Информационно-технического обеспечения ОВД, к. ф-м. н., доцент, Воронежский институт МВД России. Область научных интересов: методы системного моделирования, теории векторной оптимизации и экстраполяции экспертных оценок, теории выбора и принятия решения, вычислительной математики, теории графов, структурного и системного программирования, новые информационные технологии, модели и алгоритмы для организации и управления движением городского пассажирского транспорта.

Belokurov, Sergey Vladimirovitch, lecturer of the department of information-and-technical support of the Internal Affairs candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh Institute of Ministry of Internal Affairs of Russia. Area of research: methods of system modeling, theories of vector optimization and expert assessment extrapolation, theories of choice and taking decisions, computing mathematics, graph theory, theory of structural and system programming, new information technologies, models and algorithms for organizing and controlling city passenger traffic.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2008 А. М. Гареев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена модель изменения состояния рабочей жидкости в гидравлической системе воздушного судна на протяжении межремонтного ресурса. Модель разработана на основе теории марковских процессов и предназначена для определения состояния чистоты рабочей жидкости с применением упреждающих технологий обслуживания в целях увеличения срока службы компонентов гидравлической системы воздушного судна.

Гидравлическая система, рабочая жидкость, модель состояния, контроль технического состояния, упреждающее обслуживание, чистота рабочей жидкости

Упреждающее обслуживание – это деятельность по обнаружению и коррекции источников отклонений параметров, в частности, чистоты рабочей жидкости (РЖ), которые приводят к отказу компонентов гидравлической системы (ГС) воздушных судов (ВС).

Долговечность компонентов ГС может быть значительно увеличена поддержанием параметров чистоты РЖ в соответствии с программой упреждающего обслуживания, которая требует оценки вероятности P состояния чистоты РЖ при известных параметрах интенсивности изменения этих состояний I_{ij} .

Как показала практика эксплуатации ВС, надёжность ГС в существенной степени определяется постоянством параметров РЖ (вязкостью, кислотностью, диэлектрической проницаемостью и др.), в том числе и чистотой жидкости [1, 2, 3, 4]. Анализ отказов и нарушений работы ГС показывает, что более 20 % из них связано с недопустимым загрязнением РЖ. Согласно отечественному и зарубежному опыту [4, 5], повышенная загрязнённость РЖ приводит к снижению долговечности агрегатов в 1,5 – 3 раза и более.

Исследования показали, что проблема обеспечения надёжности и долговечности ГС в настоящее время существенно связана с проблемой оперативного контроля чистоты жидкости в условиях эксплуатации ВС, которая может быть решена посредством ре-

ализации упреждающих технологий обслуживания ГС. Установлено, что средние показатели производственной экономии, достигнутые благодаря применению упреждающего подхода, составляют:

- сокращение расходов на обслуживание: 25-30 %,
- уменьшение времени простоя: 35 – 45%,
- увеличение производительности: 20 – 25 %.

Известно [3, 4], что наиболее информативным и удобно обрабатываемым параметром, характеризующим состояние элементов ГС, является загрязнённость РЖ в виде количества частиц загрязнения N_c :

$$N_c = N_0 + N_{gi} + N_{BH}, \quad (1)$$

где N_0 – первоначальное количество частиц загрязнения в жидкости; N_{gi} – количество частиц загрязнений, вносимых в систему в результате приработки, нормального и абразивного износа g_i компонента системы; N_{BH} – количество частиц загрязнений, поступающих через уплотнения штоков силовых цилиндров системы управления и шасси ВС.

Процесс загрязнения РЖ при функционировании ГС может быть интерпретирован как образ роста, который возникает в рамках пространственно-временного представления согласно теории распознавания образов [6]. Данный процесс стохастически определяется факторами внутренней организации объектов ГС и взаимодействия их с РЖ.

Количество и размер частиц, выделяемых соприкасающейся парой, представляет ценную информацию о техническом состоянии компонентов ГС, на основании которой можно получить необходимые сведения о процессе загрязнения.

Первоначально, согласно требованиям ГОСТа 17216–2001, чистота РЖ в таре перед заправкой ГС ВС соответствует 5 классу. Но при эксплуатации ВС чистота РЖ в основных точках ГС изменяется (таблица 1).

Методы обнаружения и коррекции отклонений параметров РЖ и распознавания её характеристик важны для предупреждения отказов ГС. Ключевым фактором программы упреждающего обслуживания является знание вероятности состояния жидкости при известных законах интенсивности её загрязнения.

Экспериментально установлено, что каждый элемент ГС в отдельности имеет определённую интенсивность I генерации частиц загрязнений в РЖ, зависящую от времени наработки ГС. Генерация частиц загрязнения нерегулярна и носит случайный характер. Интенсивность I (плотность) потока загрязнения в зависимости от времени наработки отдельно взятых агрегатов и всей ГС подчиняется пуассоновскому закону распределения (в силу предельных теорем для суммарного и редееющего потоков [7]), а вероятность изменения загрязнения во времени определяется следующим соотношением:

$$P_n(t) = \frac{(I \cdot t)^n}{n!} e^{-I \cdot t}, \quad (2)$$

где $I = \frac{1}{T_{cp}}$ – интенсивность потока загрязнения (параметр потока); T_{cp} – средняя длина промежутка времени между поступлениями загрязнений.

Для того, чтобы добиться стабильности функционирования ГС, зависящей от чистоты РЖ, загрязнения в ней должны быть выявлены и идентифицированы, проанализированы и измерены и сдержаны на уровне ниже критического допустимого предела для компонентов ГС.

Рассмотрим следующую постановку задачи моделирования оценки состояния загрязнения РЖ. Пусть дана некоторая ГС S , которая с течением времени меняет своё состояние. Состояние ГС в любой момент времени можно охарактеризовать численными значениями концентрации загрязнения, которые назовём фазовыми координатами ГС. При этом состояние ГС представим в виде точки x_j с координатами в фазовом пространстве e (рис. 1). Тогда изменению состояния жидкости ГС в процессе эксплуатации ВС будет соответствовать некоторая траектория точки x_j в фазовом пространстве e . Кривую, получаемую как траекторию движения этой точки в фазовом пространстве, будем описывать функцией $S = f(N; t)$.

Введём случайную величину концентрации загрязнения жидкости $N_i \in e$, соответствующую номеру состояния x_j , в котором находится ГС в момент времени t_j . Обозначим через E_{t_j} событие, состоящее в том, что

Таблица. 1. Уровень загрязнения РЖ в основных точках ГС

№ п.п.	Участок гидравлической системы	Класс чистоты жидкости
1	Бак – на выходе	7 – 9
2	После насоса – в линии дренажа – в линии нагнетания	9 – 11 7 – 9
3	После фильтра нагнетания	4 – 5
4	После потребителей (подсистем) – шасси – механизации – управления	7 – 10 7 – 9 6 – 8

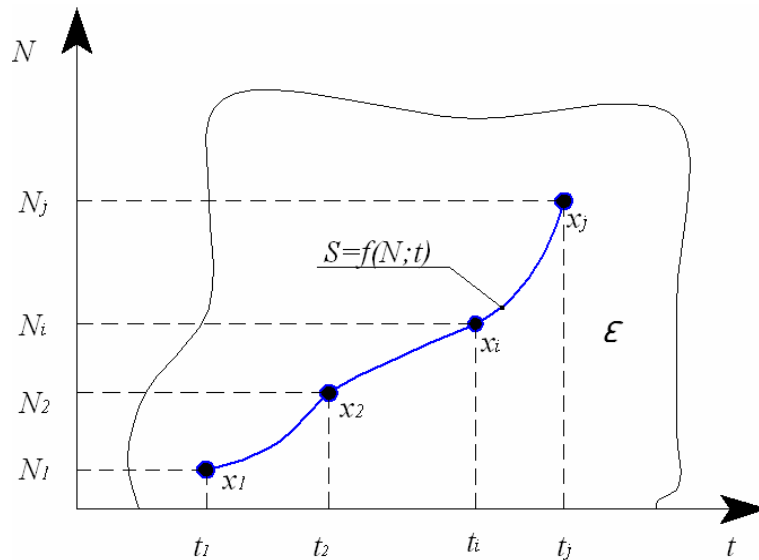


Рис. 1. Изменение состояния загрязнения рабочей жидкости ГС

в момент времени t_j система находится в состоянии x_j .

Обозначим условную вероятность того, что в момент времени $t_j = t_i + t$ уровень загрязнённости РЖ будет в состоянии x_j , если в момент времени t_i он был в состоянии x_i через $P_{i,j}(t_i, t)$.

В [3] установлено, что чистота РЖ за весь период эксплуатации меняется в диапазоне от 2 до 13 класса. Согласно исследованиям [2, 4, 5] условно разделим указанный диапазон классов чистоты РЖ по четырём основным типам состояний ГС: первоначальное (исходное), нормальное, предотказное и отказ. Данное разделение представим в виде таблицы 2.

Тогда модель изменения состояния РЖ будет включать в себя четыре основных состояния (рис. 2):

- 1) x_0 – первоначальное состояние (исходное), соответствующее чистоте РЖ в заводской таре перед заправкой ГС;
- 2) x_1 – нормальное состояние, соответствующее чистоте РЖ, обеспечивающей приемлемый уровень надёжности ГС;
- 3) x_2 – предотказное состояние, соответствующее интенсивному увеличению уровня загрязнения РЖ;
- 4) x_3 – состояние, вызывающее отказ узла или агрегата ГС.

Переход РЖ из одного состояния в другое происходит под воздействием пуассоновского потока частиц загрязнений с интенсивностью I_{ij} или $I_{j,i}$.

Составим уравнения, определяющие вероятности $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ того, что РЖ в любой момент времени t будет находиться в состоянии x_0 , x_1 , x_2 и x_3 . Рассмотрим момент времени t и соответственно дадим ему приращение Dt . В этом случае вероятность $P_0(t + Dt)$ есть вероятность того, что в момент времени $(t + Dt)$ жидкость находится в первоначальном состоянии x_0 . Это событие может иметь четыре исхода:

А – жидкость в момент времени t была в первоначальном состоянии x_0 и за время Dt из него не вышла;

В – жидкость в момент времени t была в нормальном состоянии x_1 и за время Dt перешла в первоначальное состояние x_0 ;

С – жидкость в момент времени t была в предотказном состоянии x_2 и за время Dt перешла в первоначальное состояние x_0 ;

Д – жидкость в момент времени t была в состоянии отказа x_3 и за время Dt перешла в первоначальное состояние x_0 .

В силу ординарности пуассоновских потоков событий вероятность осуществления нескольких переходов за время Dt представляет собой величину высшего порядка малости по сравнению с Dt ($O(Dt)$).

Найдём вероятность события А:

Таблица 2. Состояния рабочей жидкости ГС ВС

Тип состояния рабочей жидкости	Класс чистоты по ГОСТу 17216–2001	В соответствии с ГОСТом 17216–2001						
		Число частиц загрязнений в объёме жидкости 100±5см ³ , при размере частиц, мкм						Масса загрязнений, % не более
		5 – 10	10 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 200	Волокна	
Первоначальное (исходное)	5	500	250	25	4	1	-	-
	6	1000	500	50	6	2	1	0,0002
Нормальное	7	2000	1000	100	12	4	2	0,0002
	8	4000	2000	200	25	6	3	0,0004
Предотказное	9	8000	4000	400	50	12	4	0,0006
	10	16000	8000	800	100	25	5	0,0008
Отказ	11	31500	16000	1600	200	50	10	0,0016
	12	63000	31500	3150	400	100	20	0,0032

$$P(A) = P_0(t) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t)) dt} \quad (3)$$

Считая величину Dt малой, а $I_{0,1}(t)$, $I_{0,2}(t)$ и $I_{0,3}(t)$ непрерывными функциями, получим

$$P(A) = P_0(t) \cdot (1 - I_{0,1}(t)\Delta t - I_{0,2}(t)\Delta t - I_{0,3}(t)\Delta t + 0(Dt)) \quad (4)$$

где $0(Dt)$ – величина высшего порядка малости по сравнению с Dt .

Событие B будет иметь место, если РЖ в момент времени t будет в нормальном состоянии x_1 и в потоке событий с интенсивностью $I_{1,0}(t)$ за время Dt наступит хотя бы одно событие, а в потоках событий с интенсивностями $I_{0,1}(t)$, $I_{0,2}(t)$ и $I_{0,3}(t)$ за это же время Dt не наступит ни одного события. Считая функцию $I_{1,0}(t)$ непрерывной, получим

$$P(B) = P_1(t) \cdot \left(1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} I_{1,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t)) dt} \quad (5)$$

Аналогичным образом, рассмотрев события C и D , получим

$$P(C) = P_2(t) \cdot \left(1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_{2,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (\lambda_{0,1}(t) + \lambda_{0,2}(t) + \lambda_{0,3}(t)) dt}; \quad (6)$$

$$P(D) = P_3(t) \cdot \left(1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_{3,0}(t) dt} \right) \cdot e^{-\int_t^{t+\Delta t} (\lambda_{0,1}(t) + \lambda_{0,2}(t) + \lambda_{0,3}(t)) dt} \quad (7)$$

Применяя теорему сложения вероятностей, будем иметь

$$P_0(t + Dt) = P_0(t) \cdot (1 - I_{0,1}(t)Dt - I_{0,2}(t)Dt - I_{0,3}(t)Dt) + I_{1,0}(t)Dt \cdot P_1(t) + I_{2,0}(t)Dt \cdot P_2(t) + I_{3,0}(t)Dt \cdot P_3(t) + 0(Dt) \quad (8)$$

где $0(Dt)$ представляет собой сумму всех членов, порядок малости которых выше Dt .

Проведя преобразования в выражении (1), получим

$$\frac{P_0(t + Dt) - P_0(t)}{Dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t) + \frac{0(Dt)}{Dt} \quad (9)$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, найдём уравнение

$$\lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{P_0(t + Dt) - P_0(t)}{Dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t) \quad (10)$$

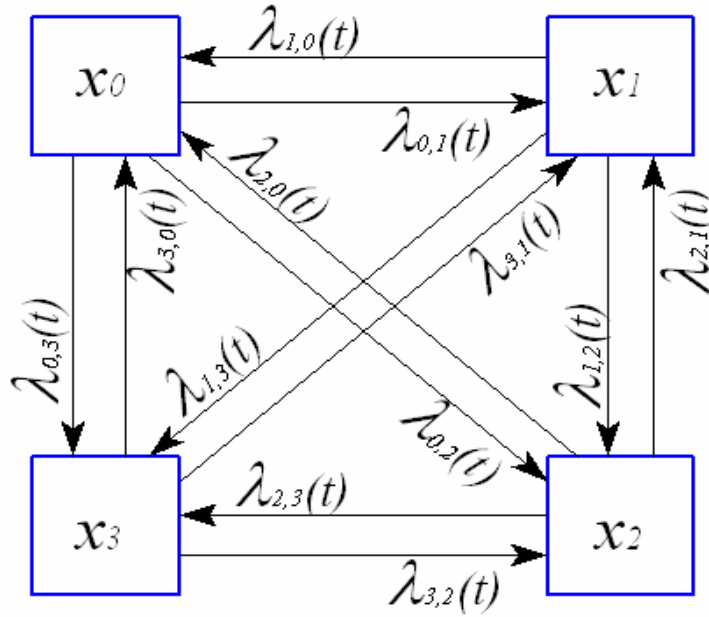


Рис. 2. Модель изменения состояния загрязнения рабочей жидкости ГС

Так как предел левой части есть производная функции $P_0(t)$, то окончательно дифференциальное уравнение для $P_0(t)$ примет вид:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(I_{0,1}(t) + I_{0,2}(t) + I_{0,3}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t) + I_{2,0}(t)P_2(t) + I_{3,0}(t)P_3(t). \tag{11}$$

Следует обратить внимание на то, что при выводе этого дифференциального уравнения использовались оба свойства пуассоновского потока событий: ординарность и отсутствие последействия.

Очевидно, пользуясь аналогичными рассуждениями и учитывая для каждого состояния все возможные переходы, можно получить систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. Исходя из опыта эксплуатации ГС ВС, установлены следующие закономерности изменения состояния РЖ.

1. Уровень загрязнения жидкости изменяется постепенно в течение длительного периода времени. Поэтому можно утверждать, что в большинстве случаев вероятности переходов состояний с интенсивностями $I_{0,2}(t)$, $I_{1,3}(t)$ и $I_{0,3}(t)$ будут стремиться к нулю,

т.е. данные переходы можно не рассматривать.

2. Уровень загрязнения жидкости под воздействием фильтров согласно исследованиям [3] может изменяться в «лучшую сторону» только в пределах двух соседних состояний, определённых в таблице 2, т. е. переходы состояний с интенсивностями $I_{2,0}(t)$ и $I_{3,1}(t)$ в первом приближении можно не рассматривать.

3. Жидкость из состояния x_3 , приводящего к отказу агрегатов и ГС в целом, с большой долей вероятности не перейдет в первоначальное состояние x_0 .

Поэтому, учитывая данные закономерности, можно записать окончательный вариант системы дифференциальных уравнений, описывающих модель изменения состояния РЖ:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -(I_{0,1}(t))P_0(t) + I_{1,0}(t)P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(I_{1,0}(t) + I_{1,2}(t))P_1(t) + I_{0,1}(t)P_0(t) + I_{2,1}(t)P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(I_{2,1}(t) + I_{2,3}(t))P_2(t) + I_{1,2}(t)P_1(t) + I_{3,2}(t)P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -I_{3,2}(t)P_3(t) + I_{2,3}(t)P_2(t). \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Для интегрирования системы (12) введём начальные условия: $P_0(0), P_1(0), P_2(0)$ и $P_3(0)$, на которые наложим естественные ограничения:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq P_k(0) \leq 1; \\ \sum_{k=1}^n P_k(0) = 1. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Необходимо заметить, что согласно исследованиям закона загрязнения РЖ при нормальных условиях эксплуатации ГС было установлено, что процесс увеличения концентрации загрязнения по времени протекает достаточно медленно. Поэтому до некоторого момента времени t_n можно утверждать, что с большой долей вероятности процесс будет считаться стационарным ($Dt = 0$) и может быть описан теорией процесса гибели, когда значение любой вероятности P_{k+1} можно выразить через все предшествующие [7]:

$$P_{k+1} = \frac{I_k}{I_{k+1}} P_k = P_0 \prod_{n=0}^k \frac{I_n}{I_{n+1}}, \quad (14)$$

где n – число переходов состояний.

Определение момента времени t_n является задачей, которую можно решить с применением датчиков встроенного контроля в рамках стратегии упреждающего обслуживания в реальном масштабе времени.

Найдём общее решение системы дифференциальных уравнений (12).

Введём вероятности (набор) переходов P_{ij} РЖ из состояния i в состояние j (P_{ij} называется переходными вероятностями).

Для стационарного процесса

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = 0 \Rightarrow P_i = \text{const} \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Тогда система дифференциальных уравнений (12) с учётом (13) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{0,1} \cdot P_0 &= P_{1,0} \cdot P_1; \\ (P_{1,0} + P_{1,2})P_1 &= P_{0,1} \cdot P_0 + P_{2,1} \cdot P_2; \\ (P_{2,1} + P_{2,3})P_2 &= P_{1,2} \cdot P_1 + P_{3,2} \cdot P_3; \\ P_{3,2} \cdot P_3(t) &= P_{2,3} \cdot P_2; \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\text{В этом случае } P_{ij}(t) = 1 - e^{-I_{ij}t} \approx I_{ij}\Delta t,$$

где I_{ij} – плотность вероятности перехода.

$$\text{Отсюда } I_{ij} = \frac{P_{ij}}{\Delta t}. \text{ При } \Delta t \rightarrow 0 \Rightarrow P_{ij} = I_{ij}.$$

На основе статистических данных можно определить вероятности нахождения РЖ

в k -ом состоянии: $P_k = \frac{n_k}{n_\Sigma}$. Здесь n_k – количество попаданий РЖ в k -е состояние за интервал времени Dt , n_Σ – общее количество переходов состояний РЖ за время Dt .

Решение системы уравнений (15) получено на использовании формул (13), (14) при известных плотностях I_{ij} вероятностей переходов.

Величина вероятностей переходов I_{ij} и I_{ji} имеют простой физический смысл: I – это обратная величина среднего времени пребывания РЖ в данном состоянии. Значения I определяются на основе статистических данных эксплуатации ВС за определённый период времени.

Полученные вероятности состояний РЖ положены в основу программы упреждающего обслуживания ГС.

Библиографический список

1. Алексеева, Т. В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта / Под ред. Башта Т. М. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Башта, Т. М. Надежность гидравлических систем воздушных судов. / Т. М. Башта. – М.: Транспорт, 1986. – 280 с.
3. Тимиркеев, Р.Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. / Р. Г. Тимиркеев, В. М. Сапожников. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
4. Fitch E.C. Fluid contamination control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. - 433р.
5. Никитин, Г.А. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность работы гидросистем летательных аппаратов. / Г. А. Ники-

тин, С. В. Чирков. – М.: Транспорт, 1969. – 184 с.

6. Гренандер, У. Лекции по теории об-разов. / У. Гренандер. – М.: Издательство

«Мир», 1979. – 382 с.

7. Овчаров, Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. / Л. А. Овчаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.

References

1. Alexeyeva, T. V., Babanskaya, V. D., Bashta, T. M. Technical diagnostics of hydraulic drives / Edited by T. M. Bashta. – Moscow: Machinostroyeniye (Machine building), 1989 – 264 pp.

2. Bashta, T. M. Reliability of aircraft hydraulic systems. – Moscow: Transport, 1986. – 280 pp.

3. Timirkeyev, R. G., Sapozhnikov, V. M. Industrial purity and fine filtration of aircraft working fluids. – Moscow: Machinostroyeniye (Machine building), 1986 – 152 pp.

4. Fitch E. C. Fluid contamination control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. – 433 p.

5. Nikitin, G. A., Tchirkov, S. V. Impact of fluid contamination of the reliability of aircraft hydraulic system operation. – Moscow: Transport, 1969 – 184 pp.

6. Grenander, U. Lectures on image theory. – Moscow: Publishing house “Mir”, 1979 – 382 pp.

7. Ovtcharov, L. A. Applied tasks of mass service theory. – Moscow: Machinostroyeniye, 1969 – 324 pp.

MODELLING CHANGES OF CONDITION OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM WORKING FLUID

© 2008 A. M. Gareyev

Samara State Aerospace University

The paper presents a model of working fluid condition changes in an aircraft hydraulic system during the overhaul period. The model is developed on the basis of Marcov process theory and intended to define the working fluid purity using lead maintenance technologies in an effort to increase life expectancy of aircraft hydraulic system components.

Hydraulic system, working fluid, model of condition, technical condition control, lead maintenance, working fluid purity

Информация об авторе

Гареев Альберт Минеасхатович, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля.

Gareyev, Albert Mineaskhatovitch, assistant of aircraft system maintenance, Samara State Aerospace University. Area of research: expeditious control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control.

РАЗРЕШАЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ РАСЧЁТА ТОНКОСТЕННЫХ МНОГОСТРИНГЕРНЫХ КЕССОНОВ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

© 2008 О. Р. Кузнецов

Саратовский государственный технический университет

Предлагается методика расчета тонкостенных многострингерных кессонов с учетом геометрической нелинейности. Исходные нелинейные соотношения линейризируются методом последовательных нагружений. В результате применения принципа Лагранжа получены разрешающие уравнения, которые представлены в виде краевой задачи для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений.

Призматические оболочки, геометрическая нелинейность, краевая задача, численное интегрирование

Совершенствование методик расчёта тонкостенных пространственных конструкций с целью выявления их резервов прочности способствует формированию теоретических представлений о возможных путях снижения массы и повышения несущей способности, которые затем реализуются в практике проектирования соответствующих конструкций.

Постановка задачи. Рассматривается вариант дискретно-континуального метода статического расчёта тонкостенных многострингерных кессонов. За расчётную схему этих конструкций берется прямая замкнутая призматическая оболочка средней длины с произвольным контуром поперечного сечения, который образован отрезками прямых. Контур поперечного сечения предполагается жёстким в своей плоскости. Торцы обо-

лочки некоторым образом закреплены. Оболочка находится под действием произвольных крутящих и изгибающих нагрузок (распределённых, сосредоточенных). Оболочка в продольном направлении усилена продольными элементами (стрингерами) с площадью поперечного сечения F_i (i - номер узла поперечного сечения). Под узлом понимается точка излома контура или точка расположения стрингера. Продольные перемещения точек контура определяются продольными перемещениями ее узлов. Продольные элементы (стрингеры) воспринимают только нормальные напряжения. Касательные и нормальные напряжения по толщине оболочки постоянные.

Статико-геометрическая модель (рис. 1). В соответствии с методом В. З. Вла-

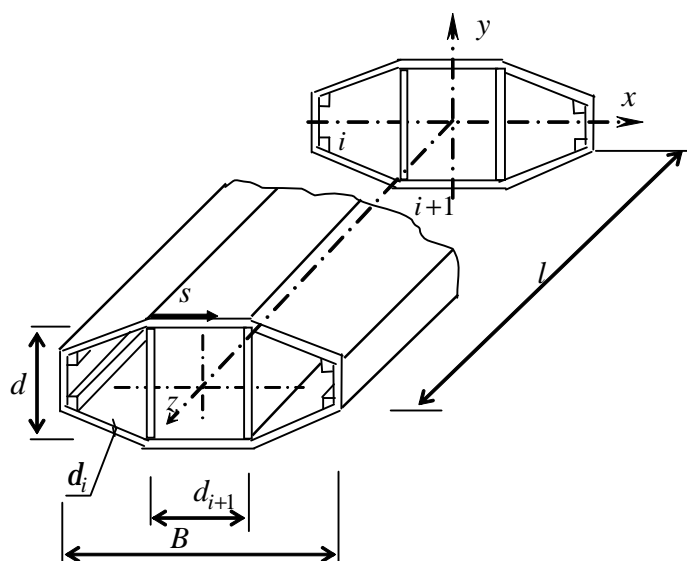


Рис. 1

сова расчёта призматических оболочек средней длины компоненты вектора перемещений точек контура в продольном (в направлении оси z) и вдоль контура оболочки (в направлении оси s) задаются соответственно в виде

$$U(z, s) = B \sum_{i=1}^n U_i(z) j_i(s) = BU_i(z) j_i(s); \langle i \rangle, \quad (1)$$

$$V(z, s) = B \sum_{h=0}^m V_h(z) y_h(s) = BV_h(z) y_h(s); \langle h \rangle, \quad (2)$$

где $j_i(s), y_h(s), (i = 1, \dots, n; h = 0, \dots, m)$ - задаваемые безразмерные аппроксимирующие функции; $U_i(z), V_h(z)$ - неизвестные безразмерные функции, подлежащие определению. В дальнейшем для сокращения записи символ “ Σ ” опускается, вместо него используется символ $\langle \rangle$, который означает суммирование по соответствующему индексу. К системам аппроксимирующих функций $j_i(s), y_h(s)$ предъявляются следующие требования:

- линейная независимость, желательно ортогональность, то есть выполнение условий:

$$\oint j_i(s) j_j(s) ds = 0 \quad (i \neq j), \quad (3)$$

$$\oint y_k(s) y_h(s) ds = 0 \quad (k \neq h);$$

- полнота;

- правильное отражение характера соответствующих перемещений (эти функции должны являться ортогональным базисом в Гильбертовом пространстве продольных и поперечных перемещений).

Геометрические размеры оболочки задаются следующими безразмерными параметрами:

$h = B/d$ - относительная толщина профиля;

$h_1 = l/B$ - относительное удлинение оболочки;

$h_2 = B/d$ - параметр, характеризующий степень тонкостенности конструкции;

$\bar{d}_i = d_i/B$ - относительная длина i -й стороны контура;

$\bar{d}_i = d_i/d$ - относительная толщина i -й пластинки;

$\bar{z} = z/l; \bar{s} = s/B$ - безразмерные координаты точек контура.

Здесь d, B - характерные поперечные размеры контура; d - характерная толщина пластинок, составляющих оболочку.

Отметим, что во всех нижеприведённых выражениях величины приведены в безразмерном виде для безразмерных \bar{z} и \bar{s} . Чтобы не загромождать запись, верхняя черточка, которая символизирует безразмерный вид, опускается. В частности, под z и s подразумевается \bar{z} и \bar{s} .

В соответствии с выбранной расчётной моделью оболочки отличными от нуля компонентами деформации являются продольные деформации в направлении оси z и деформации сдвига срединной поверхности пластинок, составляющих оболочку. Зависимости между деформациями и перемещениями принимаются в виде

$$e_2 = e_z = \frac{1}{h_1} \frac{\partial U(z, s)}{\partial z} + \frac{1}{2h_1^2} \left[\left(\frac{\partial U(z, s)}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V(z, s)}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial W(z, s)}{\partial z} \right)^2 \right],$$

$$e_{12} = e_{sz} = \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{1}{h_1} \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{h_1} \left[\frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial s} \right]. \quad (4)$$

Отличными от нуля компонентами тензора напряжений являются $S_{sz}(z, s)$ и $S_z(z, s)$. По толщине пластинок, составляющих оболочку, напряжения распределены равномерно. Продольные элементы (стрингеры) воспринимают только нормальные напряжения. Зависимость между напряжениями и деформациями полагаем линейной:

$$s_2 = s_z(z, s) = Ee_2; \quad s_{12} = s_{sz}(z, s) = l_1 Ee_{12}; \quad M_k = V'_h(y_k y_h + c_k c_h); \quad < h >, \quad (12)$$

$$G = l_1 E; \quad l_1 = \frac{1}{2(1+n)}.$$

или с учётом (3)

$$M_k = V'_k(y_k^2 + c_k^2). \quad (13)$$

На этом этапе возможны следующие упрощения.

В выражении (4) учтем, что в случае жёсткого контура поперечного сечения

$$\frac{\partial V(z, s)}{\partial s} = 0, \quad W(z, s) = V_k(z) c_k(s), \quad < k >, \quad u_i(z), \quad u'_i(z), \quad u_h(z), \quad u'_h(z) \quad (i = 1, \dots, n, \quad h = 0, \dots, m) \quad (14)$$

где $W(z, s)$ - безразмерное перемещение точек контура по нормали к нему; $c_k(s)$ - соответствующая аппроксимирующая функция. Затем полагаем, что в выражениях (4), записанных с учетом (6), величинами

$$\frac{\partial U(z, s)}{\partial z}, \quad V_h(z) \frac{c_k(s)}{y_k(s)} c'_h(s) \quad (7)$$

можно пренебречь по сравнению с единицей. Тогда имеем

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\eta_1} \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2\eta_1^2} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (8)$$

$$e_{12} = \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{1}{h_1} \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (9)$$

Для линеаризации нелинейных зависимостей используется метод последовательных нагружений [1]. Имеем для приращений величин следующие выражения:

$$De_2 = \frac{1}{h_1} u'_i j_i + \frac{1}{h_1^2} u'_k M_k; \quad < i >, \quad < k >, \quad (10)$$

$$De_{12} = u_j j'_i + \frac{1}{h_1} u'_k y_k; \quad < i >, \quad < k >, \quad (11)$$

$$Ds_2 = EDe_2, \quad Ds_{12} = l_1 EDe_{12}, \quad (11)$$

где u_i, u_k - приращения искомым обобщенных перемещений и использовано обозначение

Напряжённо-деформированное состояние оболочки полностью определяется приращением обобщённых перемещений на текущем этапе нагружения

и их накопленными на j -м этапе нагружения значениями

$$U_i^{\alpha}(z), (U'_i(z))^{\alpha}, V_h^{\alpha}(z), (V'_h(z))^{\alpha}. \quad (15)$$

Вывод разрешающих уравнений. Уравнения равновесия оболочки для определения обобщённых перемещений получаются на основе принципа возможных перемещений Лагранжа. На этапе нагружения имеем

$$dDT - dDW = 0. \quad (16)$$

Здесь dDT - работа внешних сил, которая записывается в виде

$$dDT = B^2 l \int_0^1 (R(z) du_k + P_g(z) du_g) dz + B^2 (R_k^* du_k + P_g^* du_g) \Big|_{z=0}^{z=1} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} R_k(z) &= \oint p_1(z, s) y_k(s) ds, \\ P_g(z) &= \oint p_2(z, s) j_g(s) ds, \\ R_k^*(z) &= \oint p_1^*(z) y_k(s) ds, \\ P_g^*(z) &= \oint p_2^*(z) j_g(s) ds, \quad (z = 0; 1), \end{aligned} \quad (18)$$

$p_1(z, s), p_2(z, s)$ - распределённая по поверхности оболочки нагрузка, действующая соответственно в направлении осей s и z ;

$p_1^*(z), p_2^*(z), (z = 0; 1)$ - нагрузка, приложенная в торцах оболочки, отнесённая к единице длины контура и действующая соответственно в направлении осей s и z .

Расчётная модель оболочки задаётся следующим выражением:

$$dDW = Bl \int_0^1 \oint (DN_2 Dde_2 + DS_{12} Dde_{12}) dz ds, \quad (19)$$

где

$$DN_2 = EdDe_2, \quad DS_{12} = (l_1 Ed) De_{12}.$$

После выполнения преобразований получаем краевую задачу для системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений $2(n + m + 1)$ порядка с переменными коэффициентами относительно неизвестных (14).

Уравнения равновесия записываются в виде

$$A(Y^{\varepsilon-1}(z)) \cdot Dy_{\varepsilon}(z) = DQ(z). \quad (20)$$

Статические граничные условия имеют вид

$$A^*(Y^{\varepsilon-1}(z)) \cdot Dy_{\varepsilon}^*(z) = DQ^*(z), \quad (z = 0; 1), \quad (21)$$

где $A(Y^{\varepsilon-1}(z))$, $A^*(Y^{\varepsilon-1}(z))$ - матрицы коэффициентов, вычисленные с учетом накопленных на $(\varepsilon - 1)$ этапе нагружения обобщённых перемещений:

$$A(Y^{\varepsilon-1}(z)) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

$$A^*(Y^{\varepsilon-1}(z)) = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_1} a_g^i & 0_g^i & \frac{1}{h_1^2} \langle M^h j_g \rangle \\ \frac{1}{h_1^2} \langle j^i M_k \rangle & l_1 d_k^i & \frac{l_1}{h_1} \left(r_k^h + \frac{1}{l_1 h_1^3} \langle M_k M^h \rangle \right) \end{pmatrix} \quad \langle i \rangle, \langle h \rangle; \quad (g, i = 1, \dots, n) \quad (k, h = 0, \dots, m); \quad (z = 0; 1). \quad (23)$$

Элементы матрицы $A(Y^{\varepsilon-1}(z))$ имеют вид

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{1}{h_1^2} a_g^i, & A_{12} &= 0_g^i, \\ A_{13} &= -l_1 b_g^i, & A_{14} &= \frac{1}{h_1^3} \langle M^h j_g \rangle, \\ A_{15} &= -\frac{l_1}{h_1} \left(c_g^h - \frac{1}{l_1 h_1^2} \langle (M^h)' j_g \rangle \right), \\ A_{21} &= \frac{1}{h_1^3} \langle j^i M_k \rangle, & A_{22} &= \frac{l_1}{h_1} \left(d_k^i + \frac{1}{l_1 h_1^2} \langle j^i M_k' \rangle \right), \\ A_{23} &= 0_k^i, & A_{24} &= \frac{l_1}{h_1^2} \left(r_k^h + \frac{1}{l_1 h_1^2} \langle M_k M^h \rangle \right), \\ A_{25} &= \frac{1}{h_1^4} \langle (M_k M^h)' \rangle. \end{aligned} \quad (24)$$

Отметим, что элементы матриц A и A^* сами являются матрицами. Индексы g, k задают номер строки; i, h – номер столбца матрицы.

Векторы-столбцы искомого приращённого обобщённых перемещений на ε -м этапе нагружения имеют вид

$$\begin{aligned} Dy_{\varepsilon}(z) &= (u_i''(z), u_i'(z), u_i(z), \\ u_h''(z), u_h'(z))_{\varepsilon}^T \quad (i = 1, \dots, n, \quad h = 0, \dots, m); \\ Dy_{\varepsilon}^*(z) &= (u_i'(z), u_i(z), u_h'(z))_{\varepsilon}^T \quad (25) \\ (i = 1, \dots, n, \quad h = 0, \dots, m); \quad z = 0; 1. \end{aligned}$$

Векторы-столбцы правых частей имеют вид

$$\begin{aligned} DQ(z) &= -\frac{h_2}{E} (P_g(z), R_k(z))^T \\ (g = 1, \dots, n, \quad k = 0, \dots, m); \\ DQ^*(z) &= \frac{1}{Ed} (P_g^*(z), R_k^*(z))^T \\ (g = 1, \dots, n, \quad h = 0, \dots, m); \quad (z = 0; 1). \end{aligned} \quad (26)$$

Метод решения. Полученная краевая задача может быть решена численным интег-

рированием путем сведения к серии задач Коши. Численное интегрирование полученной краевой задачи сопровождается явлениями численной неустойчивости. Для преодоления этих проблем использован метод С. К. Годунова [2].

Рассмотрим порядок получения решения для нагрузки

$$Q(z) = N \cdot DQ(z);$$

$$(Q^*(z) = N \cdot DQ^*(z), (z = 0; 1)), \quad (27)$$

где N -количество ступеней нагружения. На первом этапе нагружения (при $\alpha = 1$) в коэффициентах (23), (24) полагаем $M_k = M'_k = 0$, т. е. рассматривается геометрически линейная задача, а также полагаются равными нулю обобщенные перемещения (15). В результате получается линейная краевая задача (20), (21) с постоянными коэффициентами. Вид этих разрешающих уравнений точно совпадает с разрешающими уравнениями В. З. Власова для оболочек такого типа. В результате решения краевой задачи получают значения приращений обобщенных перемещений (14). Затем обобщенные перемещения (15) полагаются равными полученным приращениям обобщенных перемещений (14). Вычисляются коэффициенты (23), (24) с учетом полученных значений обобщенных перемещений (15) и, соответственно, отличными от нуля значениями M_k, M'_k . Эти коэффициенты становятся переменными, зависящими от z . Затем решается линейная краевая задача (20), (21), но теперь с переменными коэффициентами. Находятся приращения обобщенных перемещений (14) на втором этапе нагружения ($\alpha = 2$). К значениям обобщенных перемещений (15) прибавляются полученные ($\alpha = 2$) приращения обобщенных перемещений (14). Полученные таким образом значения обобщенных перемещений (15) дают решение задачи для нагрузки:

$$Q(z) = 2 \cdot DQ(z);$$

$$(Q^*(z) = 2DQ^*(z), (z = 0; 1)). \quad (28)$$

Описанная процедура выполняется N раз до достижения значений нагрузки, рав-

ной $Q(z), Q^*(z)$ (выражения (27)). Основные трудности вычислительного плана возникают при пересчёте на каждом этапе нагружения коэффициентов, связанных с нелинейностью. Они на этом этапе таковы, что ставят под сомнение возможность получения правильных численных результатов. Поэтому важным этапом при решении задач такого типа является обоснованное упрощение выражений для коэффициентов, связанных с нелинейностью. Первый этап упрощений реализован выражениями (6), (7). Второй этап проведём на основе анализа выражений для коэффициентов (23), (24). Этот анализ показывает, что с учетом вида выражения (13) для M_k можно пренебречь членами, содержащими их квадраты, и производной по z от этого квадрата, а также произведениями M_k, M'_k на продольные перемещения и производные по z от продольных перемещений как членами более высокой малости по сравнению с другими. Тогда имеем для коэффициентов (22) матрицы A :

$$A_{21} = 0, \quad A_{22} = \frac{l_1}{h_1} d_k^i,$$

$$A_{23} = 0, \quad A_{24} = \frac{l_1}{h_1^2} r_k^h, \quad A_{25} = 0 \quad (30)$$

и для матрицы A^* граничных условий (23):

$$A^*(Y^{n-1}(z)) = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_1} a_g^i & 0_g^i & \frac{1}{h_1^2} \langle M^h j_g \rangle \\ 0_k^i & l_1 d_k^i & \frac{l_1}{h_1} r_k^h \end{pmatrix}, \quad (31)$$

где коэффициенты матрицы вычисляются следующим образом:

$$a_g^i(z) = \oint j_g j_i \bar{d} ds = \langle j_g j_i \rangle,$$

$$b_g^i(z) = \langle j_g' j_i' \rangle,$$

$$c_g^h(z) = \langle y_h j_g' \rangle, \quad d_k^i(z) = \langle y_k j_i' \rangle,$$

$$r_k^h(z) = \langle y_k y_h \rangle, \quad (32)$$

$$\langle M^h j_g \rangle = \oint M_k j_g \bar{d} ds,$$

$$\langle (M^h)' j_g \rangle = \oint M_k' j_g \bar{d} ds. \quad (33)$$

Для записи коэффициентов символ $\langle \rangle$ означает интеграл по контуру. Напомним, что $j'_i(s) = \partial j_i(s) / \partial s$.

Таким образом, имеем краевую задачу (20), (21) с матрицами коэффициентов (22), (24), (31) с учётом (30) и выражениями (32), (33).

Продолжая анализ выражений для коэффициентов краевой задачи, отметим, что нелинейность учитывается коэффициентами (33). В случае жёсткого контура поперечного сечения эти коэффициенты точно равны нулю для всех $j_g(s)$, которые задают продольные перемещения точек контура как жёсткого диска (при неподвижном полюсе) плюс депланационные перемещения. Эти коэффициенты отличны от нуля только для функции $j_0(s)$, которая задает поступательное перемещение точек контура в продольном направлении. Поясним сказанное на следующем примере. Рассмотрим прямой однозамкнутый кессон с прямоугольным контуром поперечного сечения, который закреплён, например, как показано на рис. 2. Кессон нагружен некоторой изгибающей и крутящей нагрузкой.

Система аппроксимирующих функций в этом случае имеет вид [3], приведённый на рис. 3. Функции $j_1(s), j_3(s)$ задают продольные депланации контура соответственно при кручении и изгибе, функции $j_2(s)$ - продольные перемещения точек контура при изгибе, которые следуют закону плоских сечений. Функции $y_0(s), c_0(s)$ - перемещение точек контура в его плоскости соответственно при

кручении относительно оси z ; $y_1(s), c_1(s)$ - при изгибе в плоскости YZ . Вид функций j_1, j_3 может уточняться, но их характер симметрии относительно осей X и Y остаётся неизменным.

С учетом выражений (13) коэффициенты (33) записываются в виде

$$\langle M^h j_g \rangle = V'_h (\langle j_g y_h^2 \rangle + \langle j_g c_h^2 \rangle) = 0, \quad (34)$$

так как

$$\langle j_g y_h^2 \rangle = \oint j_g y_h^2 \bar{d} ds = 0, \quad \langle j_g c_h^2 \rangle = 0, \quad (35)$$

как интеграл от произведения кососимметричных функций j_g на симметричные $y_h^2; c_h^2$. Поэтому для возможности учёта геометрической нелинейности в условиях жёсткого контура поперечного сечения необходимо брать дополнительные функции для продольных перемещений, которые обладают свойством симметричности относительно координатных осей. Таким свойством обладают только функции вида, приведённого на рис. 4.

Функция $j_0(s)$ задает поступательные перемещения точек контура в продольном направлении, т.е. растяжимость продольной оси оболочки. Функция $j_4(s)$ и её возможные уточнения задают продольную депланацию контура, которая соответствует деформации продольной оси. Отсюда, в частности, следует, что учёт геометрической нелинейности для симметричных относительно осей x, y граничных условий для симметричной от-

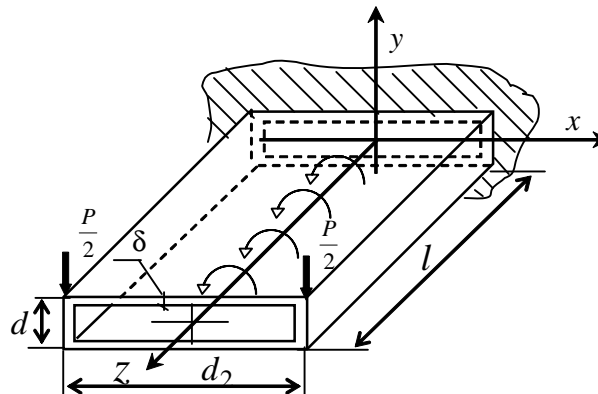


Рис. 2

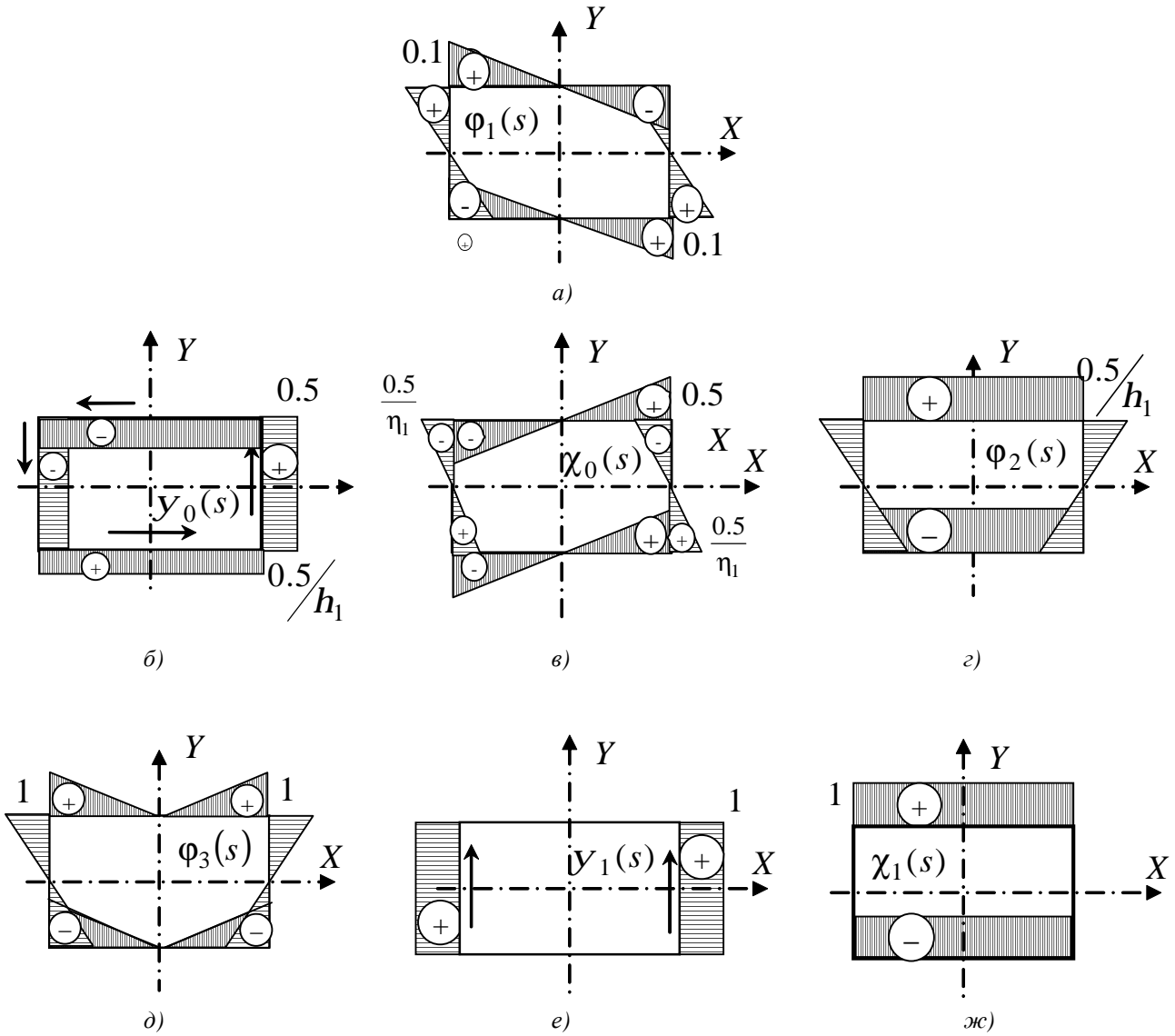


Рис. 3

носителю этих осей нагрузки приводит к несимметричному относительно осей x, y распределению напряженно-деформированного состояния точек контура оболочки.

Пример расчета. Рассмотрим кессон, изображенный на рис. 2, который находится под действием сосредоточенного крутящего момента (рис. 5). Геометрические размеры оболочки задаются следующими параметрами:

$$B = d_2; d = d_1; h = 2; h_1 = 4; B = d_2 \bar{d}_2 = 1;$$

$$\bar{d}_1 = \frac{1}{h}; \bar{d}_1 = \bar{d}_2 = 1.$$

Приращения перемещений в соответствии с (1), (2) задаются в виде

$$u(z, s) = B(u_0(z) \cdot j_0(s) + u_1(z) j_1(s)),$$

$$u(z, s) = B u_0(z) y_0(s), \tag{36}$$

где $j_1(s), y_0(s), j_0(s)$ приведены на рис. 3, а; 3, б и 4, а, соответственно. Уравнения равновесия (20) принимают вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h_1^2} a_g^0 u'' + \frac{1}{h_1^2} a_g^1 u_1'' - l b_g^0 u_0 - l_1 b_g^1 u_1 + \frac{1}{h_1^3} \langle M^0 j_g \rangle u_0'' - \\ & - \frac{l_1}{h_1} \left(c_g^0 - \frac{1}{l_1 h_1^2} \langle M' j_g \rangle \right) u_0' = 0 \quad (g=0;1), \end{aligned} \tag{37}$$

$$\frac{l_1}{h_1} d_0^0 u_0' + \frac{l_1}{h_1} d_0^1 u_1' + \frac{l_1}{h_1^2} r_0^0 u_0'' = 0.$$

Статические граничные условия (21) при $z = 1$ принимают вид

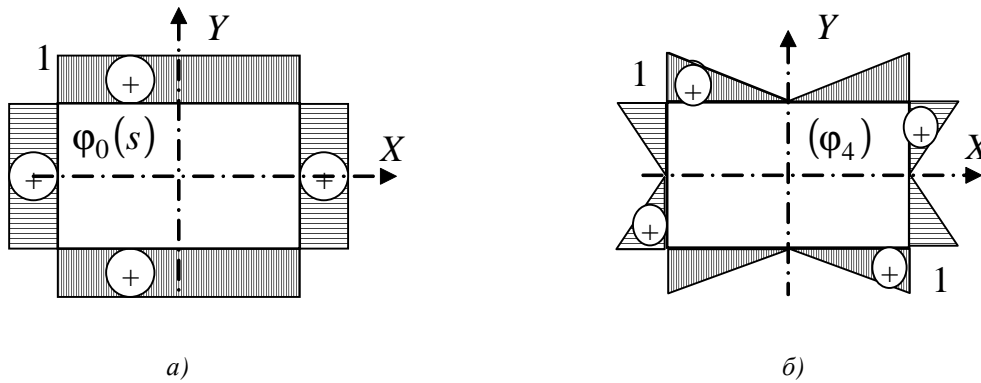


Рис. 4

$$\frac{l_1}{h_1} a_g^0 u'_0 + \frac{l_1}{h_1} a_g^1 u'_1 + \langle M^0 j_g \rangle u'_0 = 0 \quad (g = 0; 1),$$

$$l_1 d_0^0 u_0 + l_1 d_0^1 u_1 + \frac{l_1}{h_1} r_0^0 u'_0 = \frac{1}{Ed} R_0^*.$$

(38)

Геометрические граничные условия имеют вид

$$u_0 = u_1 = u_0 = 0 \quad (z = 0). \quad (39)$$

Для заданной схемы нагружения правая часть (26) уравнений равновесия (20) и граничных условий (21) в соответствии с (18) имеет вид

$$P_0(z) = P_1(z) = R_0(z) = P_0^*(1) = P_1^*(1) = 0;$$

$$R_0^*(1) = M_{kp}.$$

(40)

Получена краевая задача (37), (38), (39) для системы линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами шестого порядка относительно шести неизвестных:

$$u'_0(z), u_0(z), u'_1(z), u_1(z), u'_0(z), u_0(z). \quad (41)$$

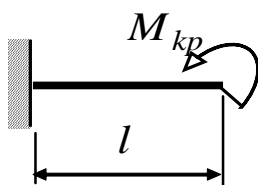


Рис. 5

Коэффициенты этой краевой задачи вычисляются с помощью выражений (32), (33). Алгоритм решения описан в разделе «метод решения».

Значение правой части в статических граничных условиях (38) на этапе нагружения принимается равным

$$\frac{2h_1(1+n)}{Ed} R_0^* = 0,0028.$$

Это соответствует значению максимального деформационного напряжения в угловой точке контура

$$Ds_1 = \frac{1}{h_1} Eu'_1 \cdot 0,1 = 42,85 \text{ МПа}.$$

Нагружение ведётся до четырнадцатой ступени нагружения $N = 14$, что соответствует $s_1 = 600 \text{ МПа}$.

На рис. 6 приведены графики изменения вдоль оболочки:

- приращений продольных перемещений, связанных с деформацией контура поперечного сечения $u_1(z) \cdot j_1(t.1) = u_1(z) \cdot 0,1$ - кривая 1 (линейная составляющая). Запись $n = 1-14$ на рис. 6 означает, что рассматриваемая кривая одинакова на всех ступенях нагружения;

- приращений продольных перемещений, связанных с растяжимостью продольной оси оболочки $u_0(z) \cdot j_0(s) = u_0(z)$ - кривая 2, для седьмой ($n = 7$) и четырнадцатой ($n = 14$) ступени нагружения (нелинейная составляющая).

На рис. 7 приведены графики изменения вдоль оболочки:

- приращений производных от продольных перемещений, связанных с деформацией контура поперечного сечения $u'_1(z) \cdot j_1(\tau.1) = u_1(z) \cdot 0,1$ - кривая 1 (линейная составляющая);

- приращений производных от продольных перемещений, связанных с растяжимостью продольной оси оболочки $u'_0(z) \cdot j_0(s) = u'_0(z)$ - кривая 2 для четырнадцатой ($n = 14$) ступени нагружения (нелинейная составляющая).

Отметим, что на рис. 7 приведены по существу графики изменения соответствующих (линейных, нелинейных) нормальных напряжений в угловой точке контура.

Анализ графиков на рис. 6, 7 показывает, что учёт геометрической нелинейности приводит к увеличению продольных перемещений (рис. 6, кривая 2) и появлению нормальных напряжений (рис. 7, кривая 2) в сечении ($z = 1$), где они отсутствовали. Перемещения в сечении $z = 1$ увеличиваются на 30 %, дополнительные напряжения в сечении $z = 1$ равны 15 МПа.

Поэтому в данном случае следует конструктивно предусматривать возможность для поступательного перемещения сечений оболочки на величину, равную до 30 % от значений максимальных деформационных перемещений, и учитывать появление нормальных напряжений в сечениях (в данном случае $z = 1$).

Начиная с уровня напряжений, равных примерно 500 МПа, перемещения $U_0(z)$ и $U'_0(z)$, связанные с учетом геометрической нелинейности, начинают резко расти. Например, приращения этих величин на одном четырнадцатом ($n = 14$) этапе нагружения равны сумме приращений на первых пяти этапах.

Выводы

1. Учет геометрической нелинейности эквивалентен отказу от гипотезы о нерастяжимости продольной оси оболочки.

2. При внешней нагрузке, которая вызывает в оболочке нормальные напряжения порядка 200-250 МПа, гипотеза о нерастяжимости продольной оси выполняется с высокой степенью точности. Вклад геометрической нелинейности для нормальных напряжений составляет до 1,2 % от максимальных; для перемещений - от 1 % до 8 % от максимальных.

3. При внешней нагрузке, которая вызывает в оболочке нормальные напряжения до 600 МПа, имеет место сложное взаимодействие величины деформации продольной оси оболочки с другими компонентами её напряжённо-деформированного состояния. Величина этого взаимодействия зависит от схемы нагружения и схемы закрепления её торцов, а также от геометрических параметров оболочки. Для ряда расчётных схем учёт геометрической нелинейности выявляет перераспределение характера её напряжённо-деформированного состояния, которое не-

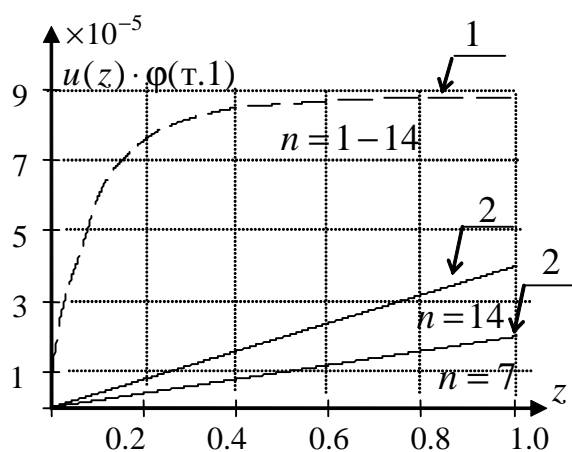


Рис. 6

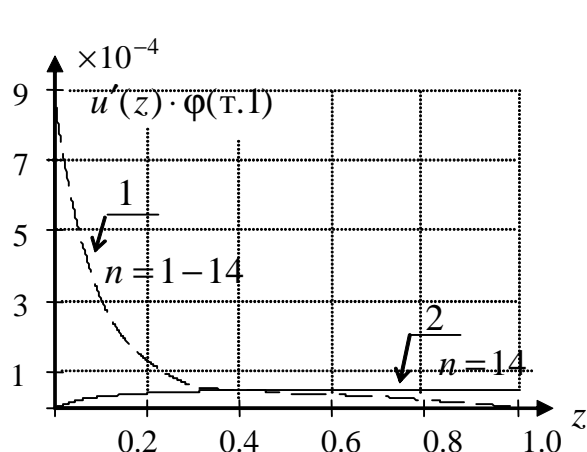


Рис. 7

обходимо учитывать в практике проектирования соответствующих конструкций.

4. При внешней нагрузке, которая вызывает в оболочке напряжения, равные примерно 500 МПа, перемещения и напряжения, связанные с учётом геометрической нелинейности, т.е. $U_0(z)$ и $U'_0(z)$, начинают резко расти.

5. При использовании конструкционных материалов, допускающих эксплуатационные напряжения 1000-1200 МПа и выше, доля напряженно-деформированного состояния оболочки, связанная с учётом геометрической нелинейности, может составить существенную величину. Поэтому расчёт конструкций такого типа при ожидаемых уровнях напряжений 1000-1200 МПа и выше при использовании гипотезы о нерастяжимости продольной оси оболочки может привести к неправильному представлению о ее напряженно-деформированном состоянии.

Библиографический список

1. Петров В. В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1975.
2. Власов В. З. Избранные труды. – М.: Наука, 1964.
3. Образцов И. Ф. Вариационные методы расчёта тонкостенных авиационных конструкций. – М.: Машиностроение, 1966.
4. Образцов И. Ф., Онанов Г. Г. Строительная механика скошенных тонкостенных систем. – М.: Машиностроение, 1973.
5. Петров В. В., Кузнецов О. Р. Некоторые нелинейные задачи расчёта прямых замкнутых призматических оболочек. (Монография)/Саратов. гос.техн. ун-т. – Саратов, 1996. – 85 с. – Деп. в ВИНТИ, 31.10.96, № 3197-В96 ДЕП.

References

1. V. V. Petrov. Successive loading method in the non-linear theory of plates and shells. – Saratov: Saratov State University Publishing House, 1975.
2. V. Z. Vlasov. Selected works. – Moscow: Nauka (Science), 1964.
3. I. F. Obratsov. Variational methods of thin-walled aircraft structure design. – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1966.
4. I. F. Obratsov, G. G. Onanov. Structural mechanics of skewed thin-walled systems. – Moscow: Mashinostroyeniye (Machine building), 1973.
5. V. V. Petrov, O. R. Kuznetsov. Some non-linear problems of straight closed prismatic shell design. (Monograph)/Saratov State Technical University – Saratov, 1996. – 85 pp. – Dep. at All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, 31.10.96, No. 3197-B 96 Dep.

SOLVING EQUATIONS OF THIN-WALLED MULTISTRINGER TORSION BOX DESIGN IN VIEW OF GEOMETRICAL NON-LINEARITY

© 2008 O. R. Kuznetsov

Saratov State Technical University

A procedure of thin-walled multistringer torsion box design in view of geometrical non-linearity is proposed. Initial non-linear relations are linearized by the successive loading method. Solving equations are obtained by using the Lagrange principle; these are presented in the form of a boundary problem for a system of ordinary linear differential equations.

Prismatic shells, geometrical non-linearity, boundary problem, numerical integration

Информация об авторе

Кузнецов Олег Рафаэльевич, доцент, кандидат технических наук, кафедра «Механика деформируемого твёрдого тела» Саратовского государственного технического университета. Область научных интересов: расчёт прямых замкнутых призматических оболочек с учётом нелинейных факторов.

Kuznetsov, Oleg Raphaelievitch, Associate Professor, Candidate of Technical Science, Department of deformable solid body mechanics, Saratov State Technical University, e-mail orkuzn@ya.ru. Area of research: Design of straight closed prismatic shells in view of non-linear factors.

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ГЛАДКОЙ ДЕТАЛИ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

© 2008 В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, Е. А. Денискина, О. Ю. Семёнова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматриваются распределения остаточных напряжений упрочнённой гладкой детали и дополнительные сжимающие остаточные напряжения после нанесения надреза полукруглого профиля, а также различные законы изменения осевых остаточных напряжений гладкой детали, моделирующие практически все возможные случаи их распределения после упрочнения деталей известными методами поверхностного пластического деформирования.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, концентрация напряжений, перераспределение остаточных напряжений

Известно [1], что при невозможности подвергнуть поверхностным пластическим деформированием непосредственно концентратор напряжений упрочняется гладкая деталь, а затем на неё наносится концентратор. Такое упрочнение детали называется опережающим поверхностным пластическим деформированием (ОППД). При нём наблюдается заметное повышение сопротивления усталости деталей даже в том случае, когда упрочнённый слой гладкой детали при изготовлении концентратора прорезается полностью. Это обусловлено перераспределением остаточных усилий гладкой упрочнённой детали и возникновением дополнительных сжимающих остаточных напряжений [2].

Необходимо выявить наиболее рациональное распределение остаточных напряжений упрочнённой гладкой детали с тем, что-

бы дополнительные сжимающие остаточные напряжения после нанесения надреза полукруглого профиля радиуса R (рис. 1) были наибольшими или, иначе, сопротивление усталости после ОППД было наибольшим [3]. Рассматривались различные законы изменения осевых остаточных напряжений $s_z(x)$ гладкой детали (рис. 2), моделирующие практически все возможные случаи их распределения после упрочнения деталей известными методами поверхностного пластического деформирования. Здесь $x = y/R$ – расстояние от поверхности гладкой детали до текущего слоя, выраженное в долях R ; s_0 – максимальное значение осевых остаточных напряжений. В табл. 1 представлены аналитичес-

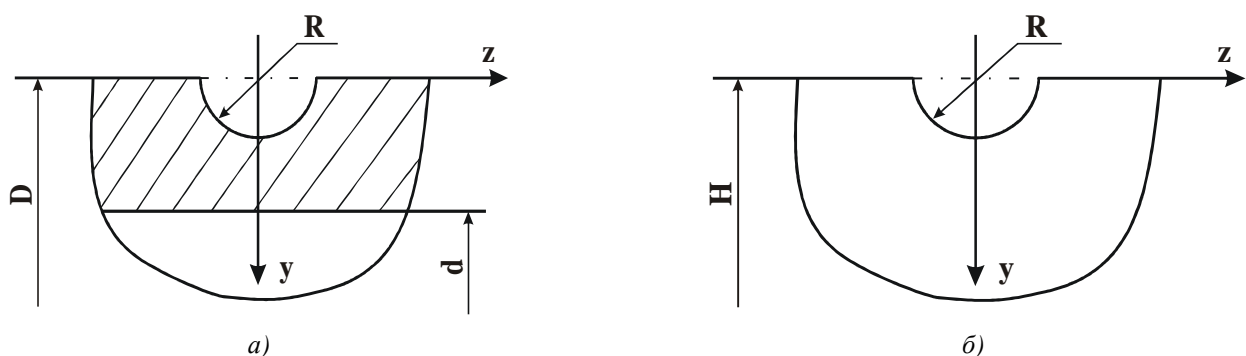


Рис. 1. Надрез полукруглого профиля на цилиндрической детали (а) и детали прямоугольного поперечного сечения (б)

Таблица 1. Варианты распределения остаточных напряжений гладкой цилиндрической детали и дополнительные остаточные напряжения на дне надреза полукруглого профиля $R = 0,3$ мм

Вариант	$\frac{S_z(x)}{S_0}$	$\frac{S_{z\delta}(1)}{S_0}$, аналитическая зависимость	$\frac{S_{z\delta}(1)}{S_0}$, численный метод			
			$D = 10$ мм	$D = 15$ мм	$D = 25$ мм	$D = 50$ мм
1	$1 - \sqrt{1 - x^2}$	0,734	0,743	0,739	0,736	0,735
2	x^2	1,023	1,042	1,034	1,029	1,026
3	x	1,296	1,319	1,315	1,302	1,296
4	$1 - (1 - x)^2$	1,590	1,621	1,612	1,596	1,587
5	$2x\sqrt{1 - x^2}$	1,324	1,388	1,376	1,368	1,356
6	$(1 - x)^2$	0,477	0,511	0,501	0,492	0,484
7	$1 - x$	0,771	0,813	0,798	0,786	0,775
8	$1 - x^2$	1,044	1,090	1,079	1,059	1,045
9	$\sqrt{1 - x^2}$	1,333	1,389	1,374	1,352	1,336
10	1	2,067	2,132	2,113	2,088	2,071

кие выражения приведённых на рис. 2 вариантов распределения остаточных напряжений, при этом нумерация вариантов табл. 1 соответствует нумерации эпюр напряжений на рис. 2.

Варианты 1–5 соответствуют обработке деталей поверхностным пластическим деформированием с интенсивными режимами упрочнения и обработке деталей из материалов с низкой температуропроводностью [4], когда наблюдается спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности, т.е. имеет место случай подповерхностного максимума напряжений. Такие эпюры напряжений реализуются, например, при обкатке роликом с большими усилиями накатывания. Упрочнение деталей на более «мягких» режимах или упрочнение деталей, изготовленных из материалов с высокой температуропроводностью, приводит к распределению остаточных напряжений по вариантам 6–9, когда максимум напряжений находится на по-

верхности детали. Вариант 10 соответствует случаю мелкого надреза, когда напряжения можно считать постоянными по толщине поверхностного слоя детали, равной радиусу надреза R .

Дополнительные осевые остаточные напряжения на дне надреза $R = 0,3$ мм $S_{z\delta}$ (1) вычислялись по аналитической зависимости работы [5] и методом конечных элементов (МКЭ). Результаты расчётов для сплошных цилиндрических деталей различного диаметра приведены в табл. 1. Можно видеть, что с увеличением диаметра деталей, т.е. с приближением к мелкому надрезу, значения $S_{z\delta}(1)$, вычисленные с использованием МКЭ, приближаются к напряжениям, вычисленным по аналитической зависимости. При $D = 50$ мм наибольшее расхождение не превышает 2,5 % (вариант 5), что свидетельствует о достаточной точности расчётов, проведенных МКЭ.

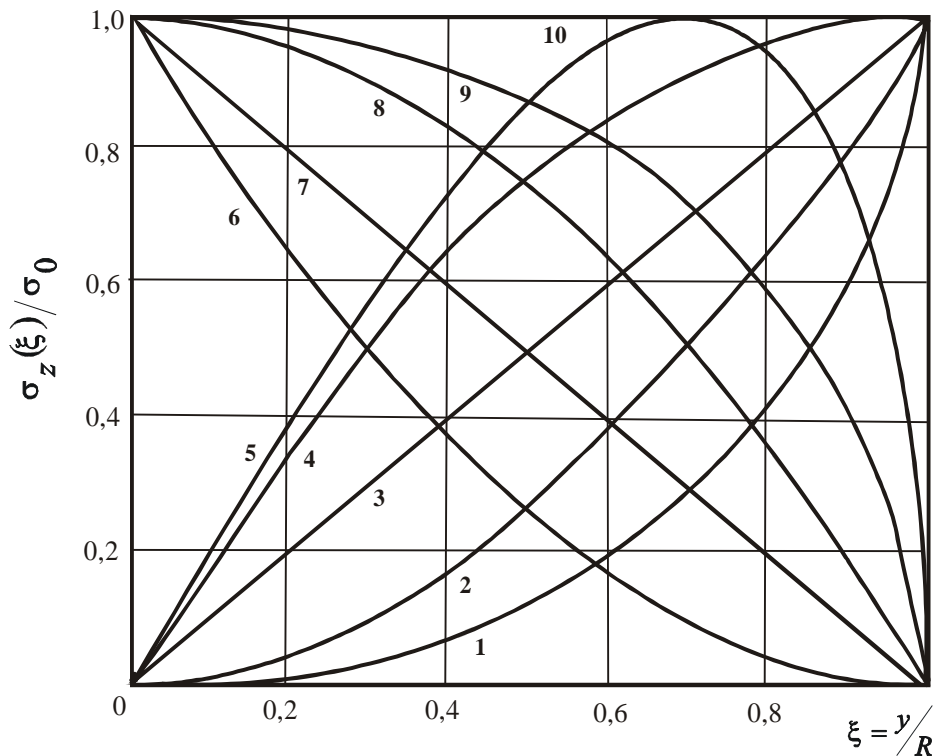


Рис. 2. Варианты распределения остаточных напряжений гладкой детали

Из сравнения дополнительных напряжений (табл. 1) на дне надреза следует, что с уменьшением диаметра при неизменной эпюре напряжений гладкой детали остаточные напряжения увеличиваются. Это объясняется уменьшением области детали, в которой происходит перераспределение остаточных усилий. Кроме того, с уменьшением диаметра увеличивается расхождение между напряжениями, вычисленными по аналитической зависимости и с использованием МКЭ, которое в варианте 6 достигает 7 %. Поэтому для повышения точности определения дополнительных остаточных напряжений в деталях малого диаметра следует применять численные методы, т. к. аналитическое решение справедливо только для достаточно мелких надрезов.

При одинаковой площади эпюр остаточных напряжений гладкой детали (рис. 2, варианты 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8) бóльшие дополнительные напряжения (табл. 1) возникают в случаях, когда бóльшие ординаты эпюр смещены к дну надреза. В этих случаях будет наблюдаться и бóльшее приращение предела выносливости упрочнённой ОППД детали [3]. Поэтому для увеличения сопротивления

усталости при ОППД необходимо стремиться не только к тому, чтобы эпюра остаточных напряжений гладкой детали была наиболее полной, но и к тому, чтобы наибольшие остаточные напряжения действовали в наиболее приближённом к дну надреза слое детали.

На рис. 3 для вариантов 1, 3, 7 и 9 распределения остаточных напряжений гладкой детали приведены дополнительные осевые напряжения $S_{z\partial}$ по толщине поверхностного слоя в наименьшем сечении детали с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленные по аналитической зависимости и с использованием МКЭ при $D = 10$ мм. Видно, что некоторое различие наблюдается на поверхности надреза, а на расстоянии от поверхности $a > 0,3$ мм напряжения практически одинаковы. При $D > 10$ мм остаточные напряжения, вычисленные МКЭ, приближаются к напряжениям, вычисленным аналитически как на поверхности надреза, так и по толщине поверхностного слоя. Аналогичные результаты получены и для других вариантов распределения остаточных напряжений и радиусов надреза R .

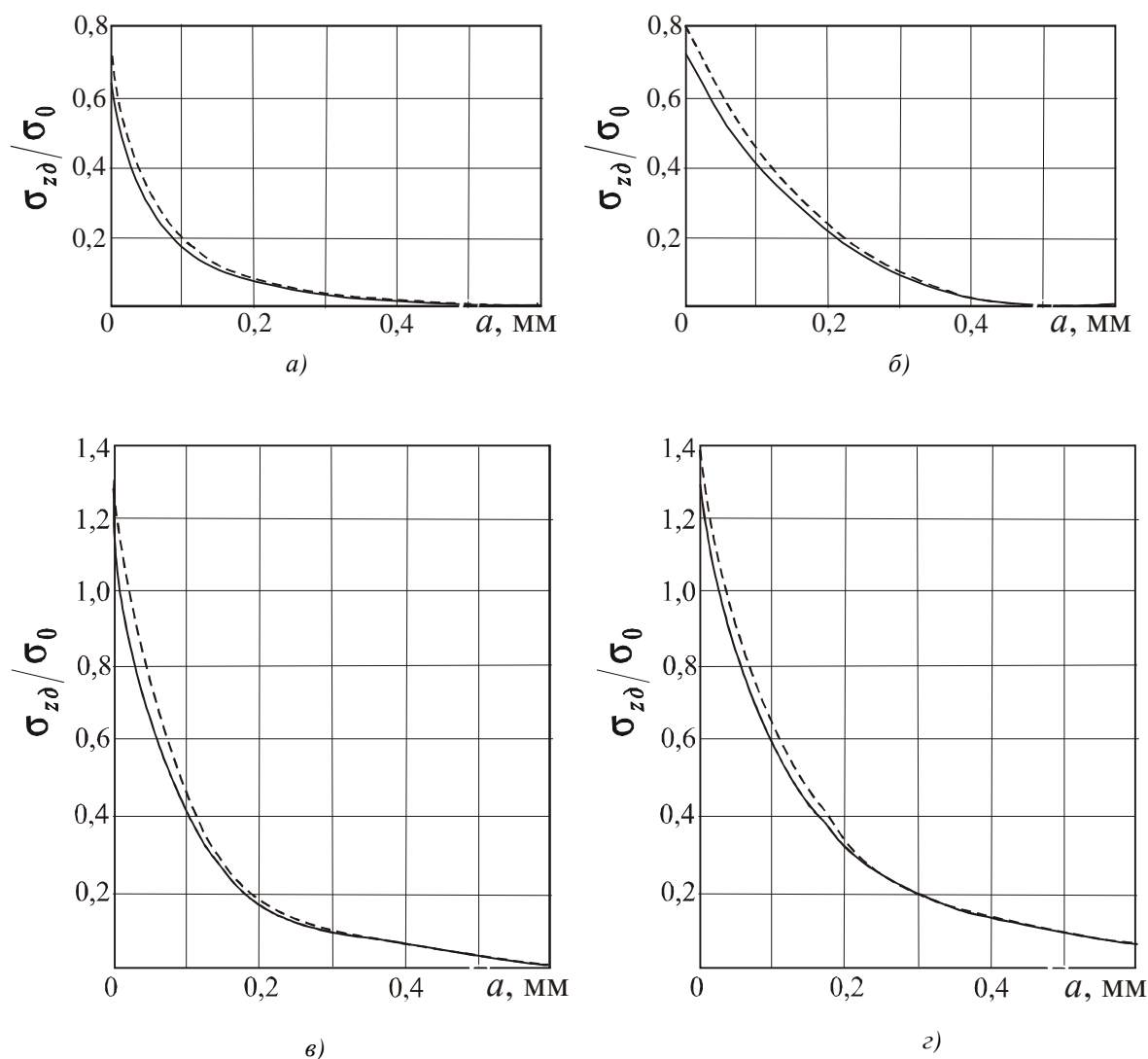


Рис. 3. Дополнительные осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали диаметром $D = 10$ мм с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленные аналитическим (—) и численным (- - -) методами для вариантов табл. 1: а – 1, б – 7, в – 3, г – 9

Изучались также закономерности распределения дополнительных осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении цилиндрической детали с отверстием диаметром d (рис. 1, а). На рис. 4 в качестве примера для вариантов 1, 3, 7 и 9 представлены графики изменения $S_{z\delta}$ в наименьшем сечении сплошных и полых деталей ($D = 15$ мм, $R = 0,3$ мм) с внутренним диаметром $d = 10$ и 12 мм. Из рис. 4 следует, что с увеличением диаметра отверстия остаточные напряжения возрастают, и тем больше, чем полнее эпюра остаточных напряжений гладкой детали. Так, для варианта 1 (рис. 4, а) при увеличении диаметра отверстия до 12 мм остаточные напряжения на поверхности надреза повышаются

на 7 % по сравнению со сплошной деталью, а для варианта 7 (рис. 4, б), где площадь эпюры напряжений гладкой детали значительно больше (рис. 2) – на 31 %. Подобные результаты получены и для других размеров D, d, R деталей и надрезов.

С увеличением расстояния a от поверхности надреза абсолютное различие между дополнительными напряжениями сплошной и полых деталей уменьшается, однако относительное расхождение остаётся примерно таким же, как и на поверхности. В связи с этим расчёт дополнительных остаточных напряжений для полых цилиндрических деталей необходимо проводить численным методом. Использование в этом случае аналитического метода [5], дающего удовлетво-

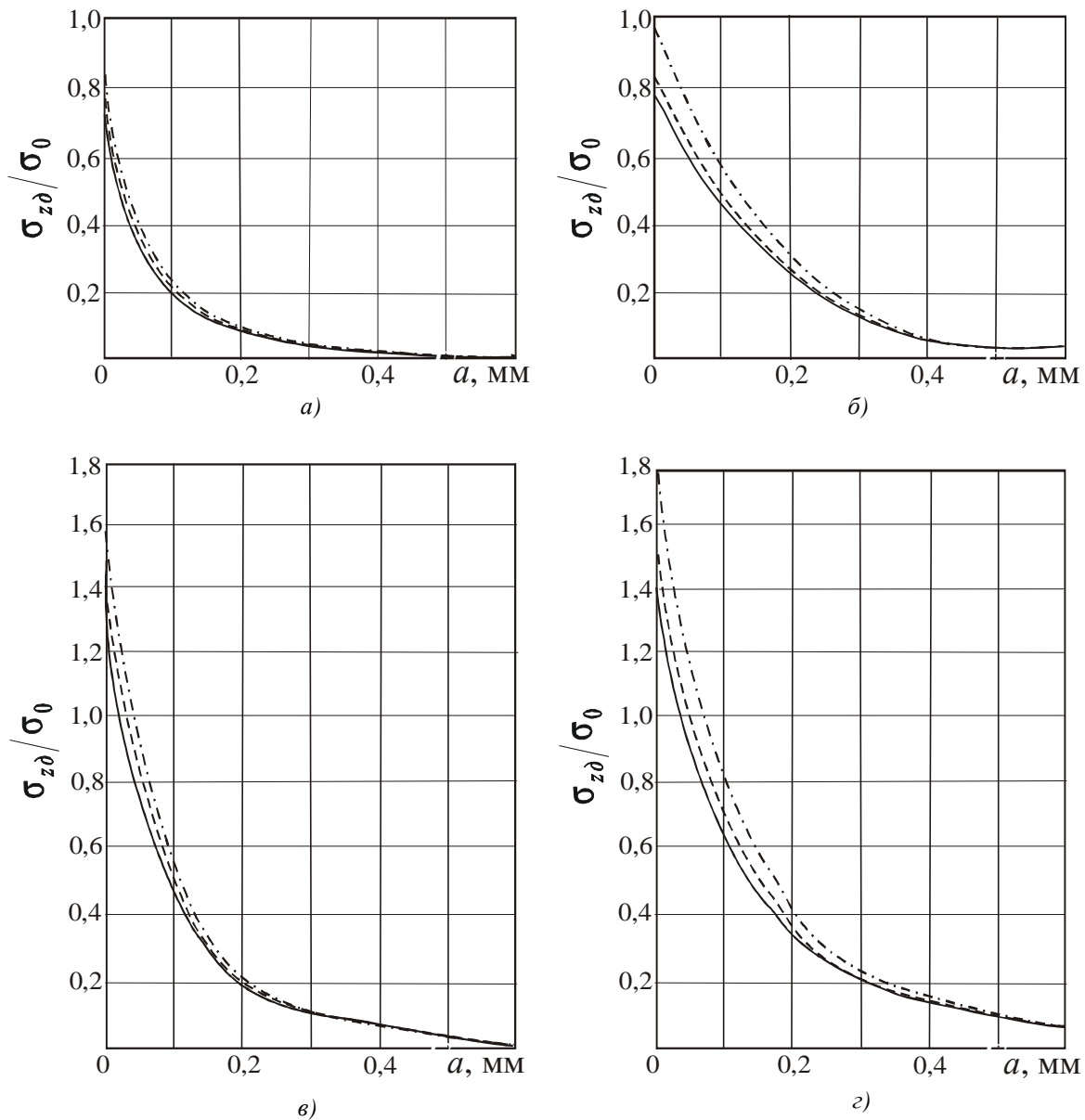


Рис. 4. Дополнительные осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении сплошных (————) и полых (- - - - $d=10$ мм, - x - x - $d=12$ мм) деталей диаметром $D=15$ мм с надрезом $R=0,3$ мм для вариантов табл. 1: а – 1, б – 7, в – 3, г – 9

рительные результаты для сплошных деталей, приведёт к существенной ошибке, которая будет возрастать с увеличением диаметра отверстия.

В табл. 2 для варианта 7 приведены дополнительные остаточные напряжения по толщине поверхностного слоя a в полых цилиндрических деталях различного диаметра при толщине стенки 5 мм с надрезом $R=0,3$ мм. Для сравнения здесь же представлены результаты расчёта S_{zd} для сплошной детали с $D=10$ мм. Из приведённых данных видно, что при одной и той же эпюре оста-

точных напряжений гладкой детали дополнительные напряжения в наименьшем сечении практически одинаковы для деталей одинаковой толщины, не зависят от диаметра и равны напряжениям сплошной детали с поперечным размером, равным удвоенной толщине стенки. Эта закономерность наблюдается и для всех других вариантов эпюр остаточных напряжений, других толщин стенок и радиусов надреза R . Следовательно, для исследованных значений D , d и R на дополнительные осевые остаточные напряжения S_{zd} в наименьшем сечении детали оказывает

Таблица 2. Дополнительные остаточные напряжения $S_{z\partial}$ в наименьшем сечении детали

Размеры детали		Расстояние от поверхности надреза – a , мм							
D , мм	d , мм	0	0,060	0,129	0,256	0,382	0,583	0,780	1,100
10	0	0,813	0,570	0,372	0,177	0,107	0,050	0,028	0,015
15	5	0,804	0,563	0,367	0,174	0,105	0,048	0,026	0,014
25	15	0,805	0,564	0,367	0,175	0,106	0,050	0,027	0,015
50	40	0,812	0,568	0,371	0,178	0,105	0,050	0,027	0,014

влияние только толщина стенки. При исследовании дополнительных напряжений в полых деталях можно использовать результаты расчёта напряжений для сплошных деталей, диаметр которых равен удвоенной толщине стенки.

Были проведены расчёты дополнительных осевых остаточных напряжений для плоских деталей с надрезами полукруглого профиля (рис. 1, б) по вариантам, представленным на рис. 2. Установлено, что все закономерности, выявленные для сплошных цилиндрических деталей, справедливы и для плоских деталей, причём дополнительные напряжения на дне надреза практически не

зависят от размера H поперечного сечения. При больших значениях $D = H$ дополнительные напряжения в цилиндрических и плоских деталях совпадают, что иллюстрируется данными табл. 3. Кроме того, результаты, приведённые в табл. 3, указывают на достаточную точность расчётов МКЭ, т.к. расхождение в величинах дополнительных напряжений для плоских деталей, вычисленных МКЭ и с использованием аналитического метода, не превышает 2,1 % (вариант 5).

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Таблица 3. Дополнительные остаточные напряжения на дне надреза полукруглой формы $R = 0,3$ мм для плоских и цилиндрических деталей

Вариант	$\frac{S_z(x)}{S_0}$	$\frac{S_{z\partial}(1)}{S_0}$, аналитическая зависимость	$\frac{S_{z\partial}(1)}{S_0}$, численный метод			
			$H = 10$ мм	$D = 10$ мм	$H = 50$ мм	$D = 50$ мм
1	$1 - \sqrt{1 - x^2}$	0,734	0,730	0,743	0,733	0,735
2	x^2	1,023	1,021	1,042	1,024	1,026
3	x	1,296	1,309	1,319	1,303	1,296
4	$1 - (1 - x)^2$	1,590	1,592	1,621	1,591	1,587
5	$2x\sqrt{1 - x^2}$	1,324	1,344	1,388	1,352	1,356
6	$(1 - x)^2$	0,477	0,475	0,511	0,477	0,484
7	$1 - x$	0,771	0,762	0,813	0,765	0,775
8	$1 - x^2$	1,044	1,048	1,090	1,044	1,045
9	$\sqrt{1 - x^2}$	1,333	1,338	1,389	1,335	1,336
10	1	2,067	2,068	2,132	2,068	2,071

1. При одинаковой площади эпюр остаточных напряжений гладкой детали в случае ОППД б́льшие дополнительные напряжения и, соответственно, б́льшее сопротивление усталости будет наблюдаться тогда, когда б́льшие ординаты эпюр остаточных напряжений смещены к дну надреза.

2. С увеличением размеров поперечного сечения детали при ОППД значения дополнительных остаточных напряжений, определенных численным методом, приближаются к значениям напряжений, полученным по аналитической зависимости.

3. Для полых цилиндрических деталей с надрезом дополнительные остаточные напряжения, вызванные ОППД, определяются толщиной стенки, не зависят от диаметра и равны напряжениям сплошной детали, диаметр которой составляет удвоенную толщину стенки полой детали.

4. Дополнительные остаточные напряжения для плоских деталей при ОППД практически равны таковым для цилиндрических деталей с одинаковыми размерами поперечного сечения и надреза.

References

I. V. Kudryavtsev, L. I. Rosenman. Endurance of surface cold-working riveted beads with notches // Metal science and thermal working of metals, 1961. – No. 3 – pp. 75-77.

S. I. Ivanov, V. F. Pavlov. Impact of residual stresses and cold-work hardening on fatigue strength.

V. F. Pavlov. Influence of the character of residual stress distribution over the thickness of the part surface layer on endurance strength // Izvestiya vuzov (News from universities). Mashinostroyeniye (Machine building) – 1987.

Библиографический список

1. Кудрявцев, И. В. Выносливость поверхностно наклёпанных валиков с надрезами / И. В. Кудрявцев, Л. И. Розенман // Металловедение и термическая обработка металлов, 1961. – №3. – С. 75–77.

2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности, 1976. – №5. – С. 25–27.

3. Павлов, В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение, 1987. – № 7. – С. 3–6.

4. Павлов, В.Ф. Влияние теплофизических характеристик материала на распределение остаточных напряжений у поверхности детали / В. Ф. Павлов // Вестник машиностроения, 1986. – №5. – С. 23–24.

5. Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях / С. И. Иванов, М. П. Шатунов, В. Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. – Куйбышев, вып. 60. – С. 160–170.

– No. 7 – pp. 3-6.

V. F. Pavlov. Influence of thermophysical properties of metal on residual stress distribution at the surface of a part // Vestnik mashinostroyeniye (Bulletin of machine building), - 1986 – No. 5 – pp. 23-24.

S. I. Ivanov, M. P. Shatunov, V.F. Pavlov. Determination of additional residual stresses in notches on cylindrical parts // Issues of aircraft construction element strength // Collection of KuAI (Kuibyshev Aviation Institute) transaction. – Kuibyshev, issue 60 – pp. 160-170.

**IMPACT OF SMOOTH PART RESIDUAL STRESS
DISTRIBUTION ON ADDITIONAL STRESSES IN CASE
OF LEADING SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

© 2008 V. F. Pavlov, V. A. Kirpichyov, Ye. A. Deniskina, O. Yu. Semyonova

Samara State Aerospace University

The paper deals with distributions of residual stresses of reinforced smooth part as well as additional compressing residual stresses after making a semicircular profile notch. Various laws of changing axial residual stresses of a smooth part which simulate practically all possible cases of their distribution after reinforcing the parts by known methods of surface plastic deformation are also discussed.

Leading surface plastic deformation, residual stresses, stress concentration, residual stress redistribution

Информация об авторах

В. Ф. Павлов, заведующий кафедрой сопротивления материалов, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

В. А. Кирпичёв, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Е. Ф. Денискина, доцент кафедры высшей математики, кандидат технических наук. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

О. Ю. Семёнова, старший преподаватель кафедры высшей математики. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

V. F. Pavlov, Head of Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Science, Professor. Area of research: residual stresses mechanics.

V. A. Kirpichyov, Associate Professor of Department of Strength of Materials, senior lecturer. Area of research: residual stresses mechanics.

Ye. A. Deniskina, Associate Professor of Department of Higher Mathematics, Candidate of Technical Science. Area of research: residual stresses mechanics.

O. Yu. Semyonova, lecturer of the Department of Higher Mathematics. Area of research: residual stresses mechanics.

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

© 2008 Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. М. Вершигоров

ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ-Прогресс”

Приведены результаты исследований, связанных с реализацией эффективной технологии магнитно-импульсной обработки. Повышение эффективности процессов связано с оптимизацией передачи энергии в цепи разряда и превращения давления импульсного поля в работу деформации и кинетическую энергию заготовки. Приведены основные выражения, позволяющие оценить величину потерь энергии, запасаемой в конденсаторах установки, при её передаче в работу деформации заготовки.

Импульсные магнитные поля, штамповка, индукторные системы, коэффициенты перегрузки, деформации детали

Процессы магнитно-импульсной штамповки характеризуются наличием высоких скоростей деформирования материалов, тепловыми эффектами, влияющими на пластичность обрабатываемых материалов, а также магнитным воздействием на структуру материалов. Электрическая энергия, накопленная в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки, затрачивается на каждый из приведённых эффектов и, следовательно, на к.п.д. процесса. Индикаторные системы оказывают наиболее существенное влияние на эффективность передачи энергии от установки в работу деформации заготовки и, следовательно, на эффективность процесса в целом. Для процессов магнитно-импульсной штамповки это является сокращением энергозатрат, необходимых при моделировании процессов и для выполнения данной операции. Энергию заряда установки, необходимую для выполнения заданной операции, можно представить в виде

$$W_D = P_{i_0} S D_{экв} \frac{I}{\hat{E}_1 \hat{E}_2 \hat{E}_3 K_4}, \quad (1)$$

где P_{i_0} - амплитудное значение давления магнитного поля; S - площадь поверхности заготовки; $D_{экв}$ - эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой; K_1 - коэффициент, численно равный доле индуктивной энергии системы установка - “индуктор-заготовка”, передаваемой в систему “индуктор-заготовка”; K_2 - коэффициент, учитывающий умень-

шение давления магнитного поля к моменту достижения первого максимума разрядного тока вследствие омических потерь в разрядном контуре; K_3 - коэффициент, учитывающий степень неоднородности магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой; K_4 - коэффициент, учитывающий уменьшение давления из-за просачивания магнитного поля сквозь заготовку.

Входящие в формулу (1) параметры практически независимы друг от друга, в связи с чем определение оптимальных условий выполнения технологических операций можно произвести, анализируя каждый из параметров. Формула (1) учитывает только электрические параметры процесса и не учитывает механику процесса деформирования и импульсный характер приложения нагрузки. Поэтому она может использоваться только для оптимизации электрических параметров процесса. При разработке и реализации эффективной технологии магнитно-импульсной обработки необходимо решать следующие основные задачи:

1. Передать с максимальной эффективностью энергию, запасённую в батареях конденсаторов, в систему “индуктор-заготовка”.
2. Эффективно преобразовать энергию, переданную в систему “индуктор-заготовка”, в давление магнитного поля на поверхности заготовки.
3. Превратить энергию давления магнитного поля в работу деформации и кинетическую энергию заготовки.

Решение каждой из перечисленных задач производится на разных уровнях протекания процесса, различными средствами при прочих разных условиях, слабо влияющих друг на друга.

Оптимизация процесса передачи энергии конденсаторов в систему “индуктор-заготовка” сводится к увеличению коэффициентов K_1 и K_2 .

Коэффициент для системы установка-индуктор-заготовка равен

$$K_1 = \frac{n^2 L_{u-3}}{n^2 L_{u-3} + L_y} \approx \frac{f_0^2 - f^2}{f_0^2}, \quad (2)$$

где n - число витков индуктора; L_{u-3} - индуктивность системы “индуктор-заготовка” в расчёте на один виток; L_y - собственная индуктивность установки; f_0 - собственная частота разряда установки; f - рабочая частота разряда.

Как видно из выражения (2), при заданной геометрии заготовки и, следовательно, заданной геометрии системы “индуктор-заготовка” ($L_{u-3} \approx const$) и частоте разряда коэффициент K_1 можно увеличить за счёт уменьшения индуктивности установки L_y , увеличения числа витков индуктора n , увеличения собственной частоты разряда установки f_0 . При этом частота разряда может быть задана, например, исходя из условия просачивания поля сквозь заготовку.

Возможности снижения тепловых потерь в индукторе также весьма ограничены из-за ограниченности номенклатуры высокопрочных материалов с высокой электропроводностью, которые могут использоваться в конструкциях индукторов.

Таким образом, изменять коэффициент K_2 можно, лишь варьируя частотой разрядного тока.

При анализе процесса преобразования магнитной энергии в давление магнитного поля на заготовку можно выделить следующие две основные причины снижения эффективности её преобразования.

1. Снижение эффективности индуцирования токов в заготовке и появление противодавления при просачивании магнитного поля сквозь заготовку.

2. Создание магнитного поля вне зазора между индуктором и заготовкой - между токоведущими поверхностями индуктора. Эффективность индуцирования токов в заготовке оценивается коэффициентом K_4 :

$$K_4 = \frac{Q_3^2}{Q_3^2 + \frac{L_u}{L_{e-\zeta}}}, \quad (3)$$

где Q_3 - добротность заготовки; L_u - индуктивность холостого хода индуктора; L_{u-3} - индуктивность системы “индуктор-заготовка”.

Очень сильное влияние просачивания поля приводит к тому, что граница оптимальных режимов системы “индуктор-заготовка” по энергозатратам практически всегда соответствует условию, при котором

$$K_4 \geq 0.3...0.5; Q_3 \geq 0.7...1.0.$$

Интегральная оценка величины электродинамических усилий, действующих на заготовку, производится с помощью коэффициента K_3 , который можно определить следующим образом:

$$K_3 = \frac{\partial L_{e-\zeta}}{\partial (\Delta_{y\dot{e}\dot{a}})} \cdot \frac{\Delta_{y\dot{e}\dot{a}}}{L_{e-\zeta}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{y\dot{e}\dot{a}}$ - зазор и одновременно координата, в направлении которой действует давление.

Для многovitкового индуктора с постоянной поверхностной плотностью тока оптимальным является случай: $\Delta_{э\kappa} \rightarrow 0$, когда поле в рабочем зазоре однородно, а эпюра давления представляет собой прямоугольник с давлением P_0 :

$$P_0 = \frac{W_{u-3}}{pDDl}, \quad (5)$$

где W_{u-3} - энергия, переданная в систему “индуктор-заготовка”; D_u - диаметр индуктора; l - ширина индуктора (токовой полосы).

При увеличении зазора поле в нём становится неоднородным вследствие краевых эффектов, часть энергии оказывается распределённой в пространстве вне рабочего зазо-

ра. С увеличением зазора при неизменной энергии системы $W_{и-з}$ уменьшение давления магнитного поля на заготовку происходит за счёт увеличения объёма рабочего зазора или из-за уменьшения коэффициента K_3 .

Основным средством повышения величины давления при заданной энергии является, в первую очередь, уменьшение рабочего объёма $pDl\Delta$, что достигается при заданной геометрии заготовки уменьшением зазора $\Delta_{экв}$. Возможности уменьшения $\Delta_{экв}$ ограничены как величиной, необходимой электрической прочности изоляции индуктора, так и технологическими требованиями - возможностью лёгкой установки и съёма детали и достаточной механической прочностью и износостойкостью главной изоляции индуктора. Поэтому остаётся возможным увеличение давления за счёт увеличения коэффициента K_3 .

Для системы “индуктор-заготовка” можно предложить аппроксимацию следующего вида:

$$\frac{1}{L_{\dot{e}-\zeta}} \cong \frac{1}{L_{\dot{r}\dot{a}\dot{i}}} + \frac{1}{L_{\dot{e}\dot{i}\dot{o}}} + \frac{1}{L_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}} + \frac{1}{L_{\dot{i}\dot{a}\dot{o}}}, \quad (6)$$

где $L_{одн}$ - индуктивность системы при однородном поле; $L_{конц}$ - концевая индуктивность; $L_{бок}$ - индуктивность боковых поверхностей спирали индуктора; $L_{обр}$ - индуктивность обратной по отношению к заготовке поверхности спирали индуктора.

Для увеличения доли полезной энергии необходимо всемерно увеличивать добавочные индуктивности ($L_{конц}$, $L_{бок}$, $L_{обр}$) и уменьшать тем самым добавочные токи.

Критерием высокой эффективности системы “индуктор-заготовка”, с точки зрения преобразования энергии поля в электродинамическое усилие, является выражение

$$\frac{1}{L_{\dot{r}\dot{a}\dot{i}}} \ll \frac{1}{L_{\dot{e}\dot{i}\dot{o}}} + \frac{1}{L_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}} + \frac{1}{L_{\dot{i}\dot{a}\dot{o}}}. \quad (7)$$

При магнитно-импульсной обработке особое значение представляет процесс превращения энергии давления магнитного поля

в работу деформации и кинетическую энергию заготовки.

При разряде конденсаторных батарей через индуктор на заготовку действует давление магнитного поля

$$P_i = D_{i_0} e^{-dt} \sin^2 wt, \quad (8)$$

где P_m - амплитудное значение давления магнитного поля; d - декремент затухания; t - время процесса; w - круговая частота разрядного тока.

Эта формула справедлива при условии, что магнитное поле не проникает сквозь заготовку и “скин-слой” будет меньше толщины заготовки, то есть

$$D = \sqrt{\frac{2}{m g_0 w}} < S. \quad (9)$$

При расчётах эффективности процесса превращения энергии давления магнитного поля в работу деформации делаются следующие допущения:

1. Давление магнитного поля равномерно по длине обрабатываемой заготовки.
2. Отсутствует просачивание магнитного поля через заготовку.
3. Деформируемая заготовка тонкостенная, т.е. $D_0 \gg S$, где D_0 - исходный диаметр заготовки.

Уравнение движения в общем случае записывается в следующем виде:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = \Sigma F, \quad (10)$$

где u - перемещение заготовки; F - действующие силы.

При принятых допущениях уравнение движения трубной заготовки можно записать следующим образом, исходя из равенства внешних и внутренних сил:

$$\frac{1}{2} r S \frac{d^2 u}{dt^2} = P_i - P_s, \quad (11)$$

где P_m - текущее давление магнитного поля на заготовку; P_s - сопротивление деформированию; r - плотность материала заготовки.

Пластическая деформация при сложно-напряжённом состоянии возможна при выполнении условия Мизеса:

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2} = s_{0.2}, \quad (12)$$

где s_1, s_2, s_3 - главные нормальные напряжения; s_i - интенсивность нормальных напряжений.

Для осесимметричного напряжённого состояния, что имеет место при деформировании трубных заготовок:

$$s_1 = s_r \quad s_2 = s_q \quad s_3 = s_z,$$

где s_r, s_q, s_z - радиальные, тангенциальные и осевые напряжения.

При свободной раздаче, когда торцы заготовки не закреплены и нет осевых сил, $s_z = 0$.

Тогда равенство (12) примет следующий вид:

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_r - s_q)^2 + s_r^2 + s_q^2}$$

или $s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{s_r^2 - 2s_r s_q + s_q^2 + s_r^2 + s_q^2}$

или $s_i = \sqrt{s_r^2 - s_r s_q + s_q^2} . \quad (13)$

При магнитно-импульсном деформировании тонкостенных заготовок ($S \ll D$) в случае резко выраженного скин-эффекта и давления магнитного поля, приложенного к поверхности заготовки, обращённой к индуктору, можно считать, что радиальные напряжения постоянны по толщине заготовки и равны давлению магнитного поля, т.е. $s_r = P_i$. Тангенциальные окружные напряжения можно определить по следующим зависимостям:

$$s_q = \frac{P_i D}{2S} \text{ или } s_q = \frac{D s_r}{2S};$$

$$\frac{D}{2S} \gg 1 \text{ и } s_q \gg s_r. \quad (14)$$

Для случая $\frac{D}{2S} \gg 1, s_q \gg s_r$ напряжённое состояние будет близко к линейному, т.е. можно принять $s_i \approx s_q$. В этом случае сопротивление пластическому деформированию определяется следующей зависимостью:

$$P_s = \frac{s_q S}{D/2} = \frac{s_{0.2} S}{D/2}. \quad (15)$$

Обозначим $\frac{P_{i_0}}{P_s} = K_{i\delta}$ - коэффициент

перегрузки, равный отношению амплитудного значения давления магнитного поля P_m к удельному сопротивлению деформирования P_r , численно равному давлению поля, при котором начинается пластическое деформирование заготовки в тангенциальном направлении при динамическом нагружении.

Тогда уравнение движения можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{2} r \frac{d^2 D}{dt^2} = P_s (K_{i\delta} e^{-d t} \sin^2 \omega t - 1). \quad (16)$$

Из (16) видно, что пластическое деформирование заготовки возможно только при K_{nep} , существенно больших единицы, т.к. $\sin^2 \omega t \leq 1, e^{-d t} < 1$.

При выводе основных зависимостей были приняты следующие допущения.

1. Разгон заготовки заканчивается после первой полуволны разрядного тока (первой полуволны давления поля), а остальные полуволны не оказывают давления на заготовку, что имеет место практически во всех операциях формовки.

2. Эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой на участке разгона мало изменяется и не влияет на величину давления поля.

3. Величина деформации заготовки на участке разгона происходит за счёт кинетической энергии.

4. Сопротивление воздуха мало и им можно пренебречь.

Исходя из условия равенства внешних и внутренних сил, определяется время начала и окончания разгона заготовки относительно начала протекания тока по индуктору и время действия давления поля.

THE EFFECT OF INDUCTOR SYSTEMS ON THE EFFICIENCY OF MAGNETIC PULSE FORMING

© 2008 Yu. Ye. Palamartchuk, A. N. Kirilin, V. M. Vershigorov

Central Design Bureau “Progress”

The paper presents the results of investigations related to the realization of efficient technology of magnetic pulse working. Higher process efficiency is due to the optimization of energy transfer in a discharge circuit and the transformation of pulse field pressure into deformation work and blank kinetic energy. The basic expressions that make it possible to determine the amount of losses of energy stored in the system’s capacitors as it is transformed into blank deformation work.

Pulse magnetic fields, forming, inductor systems, overload factors, part deformation

Информация об авторах

Кирилин Александр Николаевич, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Вершигорov Вячеслав Михайлович, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Kirilin, Alexander Nikolayevitch, general director, doctor of Technical Science, professor, Central Design Bureau “Progress”.

Palamartchuk, Yuri Yefimovitch, head of department, Central Design Bureau “Progress”.

Vershigorov, Vyacheslav Mikhailovitch, Deputy General Director for General Matters, Central Design Bureau “Progress”.

УДК 621.89.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПИТАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ

© 2008 Д. Е. Рыбальченко¹, Е. В. Шахматов², Г. О. Белов², В. Н. Илюхин²

¹ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти

²Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлена система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих работу последовательного питателя. Приведена структурная схема реализации уравнений, составляющих математическую модель последовательного питателя, позволяющая проводить исследования рабочих характеристик последовательных питателей и смазочных систем, построенных на их основе, в системе моделирования динамических процессов Simulink. Представлены результаты натурных испытаний, подтверждающих адекватность разработанной математической модели.

Математическое моделирование, динамика, проектирование, смазочные системы, последовательный питатель, трение

Важной проблемой при проектировании централизованных смазочных систем современного технологического оборудования [1, 2], для которого характерна работа на повышенных линейных и угловых скоростях, является сокращение времени цикла смазывания и повышение точности дозирования в широком диапазоне дозируемых объёмов как жидкого, так и аэрозольного смазочного материала с возможностью преодоления высоких противодавлений в смазываемых парах трения при одновременном увеличении количества пар трения, которые обеспечиваются смазочным материалом от одного смазочного насоса. Наиболее полно требованиям, предъявляемым к централизованным смазочным системам современного технологического оборудования, отвечают последовательные смазочные системы [2].

Знание закономерностей изменения рабочих характеристик последовательных питателей позволяет обеспечить оптимальный режим смазывания [3] пар трения гибких автоматических линий и обрабатывающих центров с числовым программным управлением, которые характеризуются часто меняющимся технологическим процессом и режимами обработки.

Характерной особенностью последовательных смазочных систем является пошаговая работа питателя, при которой смазка оче-

редной точки не начинается, если смазка предыдущей не завершена. Такая последовательная подача смазочного материала ко всем точкам смазочной системы позволяет осуществлять централизованный контроль поставки смазочного материала, а также использовать последовательный питатель в качестве основного распределительного устройства в адаптивных смазочных системах [1-4].

Функциональная схема пошаговой работы питателя последовательного действия серии MSP фирмы LUBRIQUIP (США) [5, 6] с тремя рабочими секциями представлена на рис. 1.

Работа питателя осуществляется следующим образом. В исходном положении дозирующе-распределительные поршни всех трех рабочих секций «А», «В» и «С» находятся в крайнем правом положении (рис. 1, а). В момент подачи смазочного материала в отверстие входной секции поршни «В» и «С» заблокированы входным давлением, действующим на левые торцы поршней, и не могут перемещаться. При этом наряду с блокированием поршней происходит заполнение их полостей смазочным материалом. Таким образом, в исходном положении только поршень «А», если величины давления смазочного материала, поступающего со стороны его правого торца, достаточно для преодоления сопротивления подаче смазочного мате-

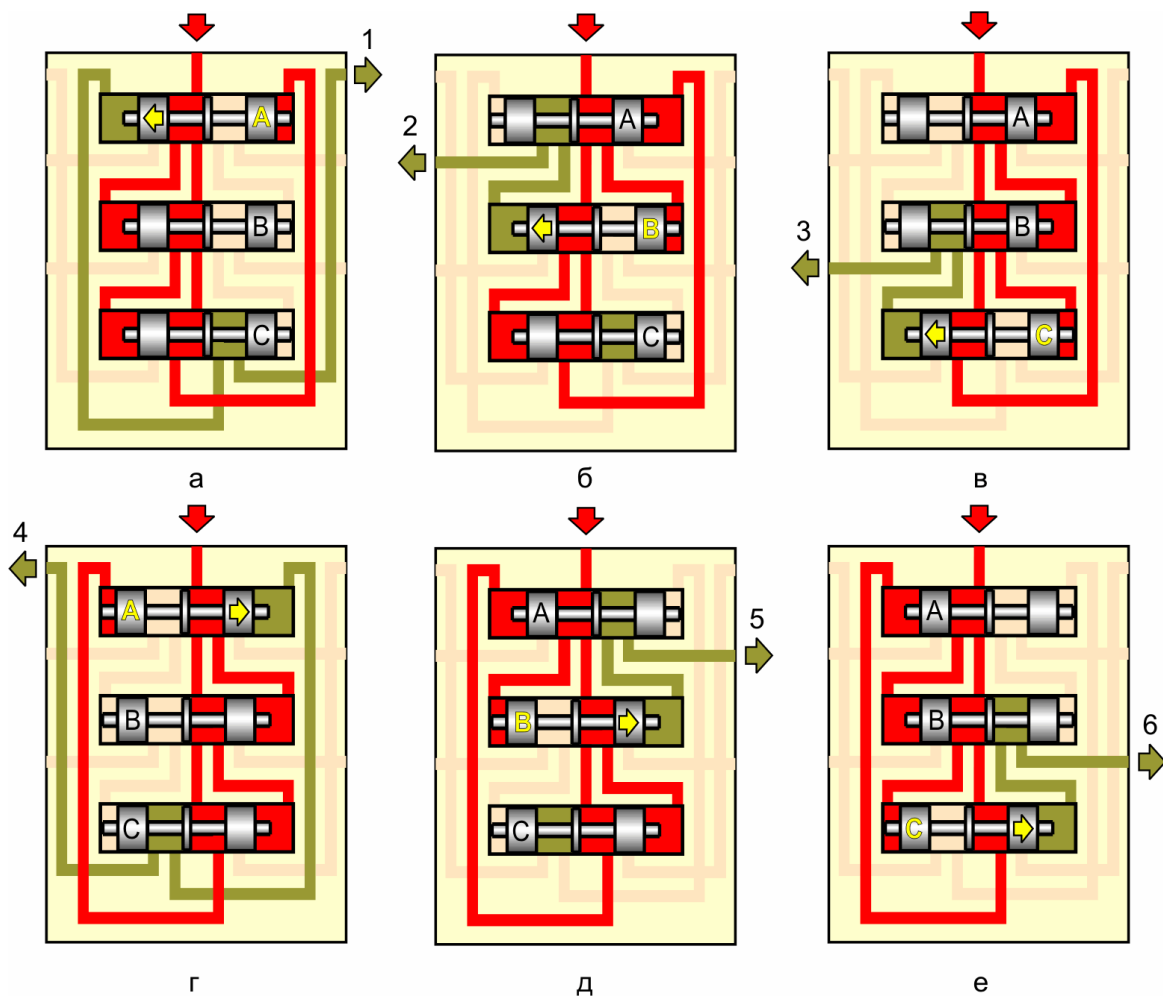


Рис. 1. Функциональная схема пошаговой последовательной работы питателя серии MSP с тремя рабочими секциями:

Первый полуцикл работы: а - подача на выход «1»; б - подача на выход «2»; в - подача на выход «3». Второй полуцикл работы: г - подача на выход «4»; д - подача на выход «5»; е - подача на выход «6»

риала в точку, подключенную к выходу «1», может начать перемещаться в крайнюю левую позицию, выдавая дозу смазочного материала и открывая канал, соединяющий левую полость поршня «В» с выходом «2».

При этом поршень «В» разблокируется и, в свою очередь, начинает перемещаться в левое положение, подавая дозу смазочного материала к выходному отверстию «2» (рис. 1, б). При соединении левой полости поршня «С» с выходом «3» в свое левое положение начнет перемещаться поршень «С», подавая дозу смазочного материала к выходному отверстию «3» (рис. 1, в). На этом первая половина цикла работы питателя завершается. Все его поршни находятся в левом положении (рис. 1, г). Перемещение поршня «С» влево приводит к разблокированию правой полости поршня «А», что делает возмож-

ным его перемещение вправо и подачу смазочного материала в точку, подключенную к выходу «4». Таким образом, питатель готов к осуществлению второй половины цикла, основные этапы которого представлены на рис. 1, г, д, е.

На завершающем этапе подачи смазочного материала в точку смазки, подключенную к выходу «5», при перемещении поршня «В» вправо происходит разблокирование правой полости поршня «С», что делает возможным подачу смазочного материала в точку, подключенную к выходу «6». После завершения подачи смазочного материала в эту точку питатель возвращается в исходное положение (рис. 1, а) и готов к новому циклу работы.

Расчётная схема подачи смазочного материала на выход рабочей секции последо-

вательного питателя с указанием давлений, действующих на поршень, представлена на рис. 2.

При условии, что поток рабочей жидкости в каналах питателя ламинарный и квазистационарный, рабочая жидкость несжимаема и ее температура постоянна, перетечки по радиальному зазору между поршнем и проточкой в корпусе рабочей секции и величина гидродинамической силы, возникающей при прохождении жидкости через дроссельную щель $S_{дщ-1}$, образованную перемещением предыдущего поршня (рис. 2), пренебрежимо малы, а силой трения покоя, определяющей начальную силу страгивания поршня, можно пренебречь, уравнение движения дозирующе-распределительного поршня питателя записывается следующим образом [7]:

$$m_{пj} \times \frac{d^2 x_{пj}}{dt^2} + I_{трj} \times \frac{dx}{dt} = S_{пj} \times (P_{3j} - P_{4j}), \quad (1)$$

где $m_{пj}$ – масса дозирующе-распределительного поршня последовательного питателя с учетом присоединённой массы жидкости в канале питателя; j – номер выхода рабочей секции питателя в соответствии с очередностью подачи смазочного материала на выходы последовательного питателя из исходного положения, когда все поршни справа; $x_{пj}$ – координата поршня питателя вдоль его оси; t_j – время; $I_{трj}$ – коэффициент, учитывающий

вязкое трение; $S_{пj}$ – площадь торцевой поверхности поршня; P_3 – давление в подводящей полости поршня; P_4 – давление в отводящей полости поршня.

Масса поршня с учетом присоединённой массы жидкости [7] в канале питателя

$$m_{пj} = m_j + m_{жк} \times \left(\frac{d_{пj}}{d_{кj}} \right)^4, \quad (2)$$

где m_j – масса дозирующе-распределительного поршня питателя; $m_{жк}$ – масса жидкости в канале после поршня питателя; $d_{пj}$ – диаметр поршня; $d_{кj}$ – эквивалентный диаметр проходного сечения канала питателя.

Площадь торцевой поверхности поршня питателя

$$S_{пj} = \frac{\rho \times d_{пj}^2}{4}. \quad (3)$$

Исходя из уравнения расхода через дроссельную щель, образованную предыдущим поршнем питателя, с учётом давлений в каналах, показанных на расчётной схеме (рис. 2), давление в подводящей полости поршня (P_3) рассчитывается по формуле

$$P_3 = P_{вх} - \Delta P_{пкj} - \frac{\left(\frac{dx_{пj}}{dt} \times S_{пj} \right)^2}{\left(m_{дщ} \times S_{дщj-1} \right)^2} \times \frac{r}{2}, \quad (4)$$

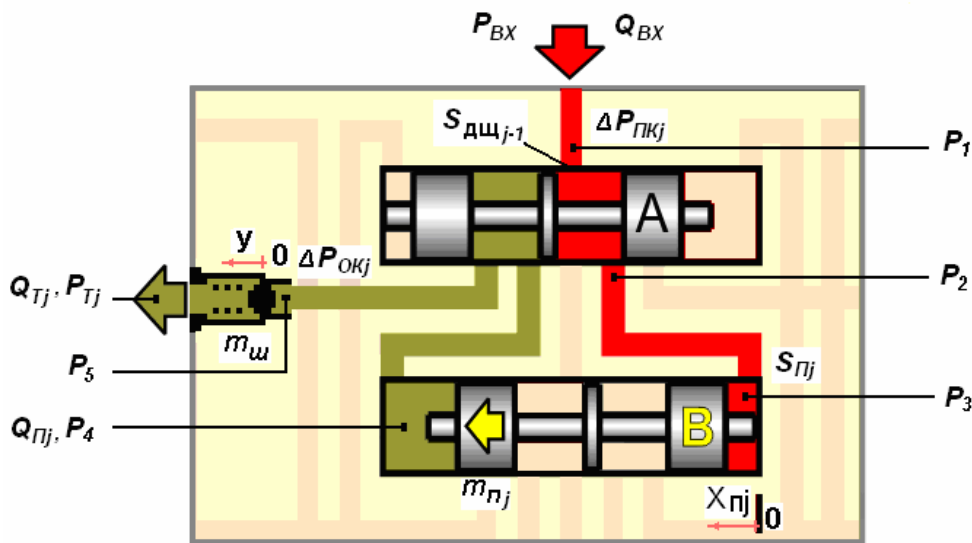


Рис. 2. Расчетная схема подачи смазочного материала на выход рабочей секции последовательного питателя серии MSP

где r – плотность рабочей жидкости; $m_{дщ}$ – коэффициент расхода дроссельной щели; $S_{дщj-1}$ – площадь проходного сечения дросселирующего элемента.

Площадь проходного сечения ($S_{дщj-1}$) дросселирующего элемента при открытии цилиндрическим дозирующе-распределительным поршнем подводящего канала круглого сечения можно определить из уравнения

$$S_{дщj-1} = 2 \times \left(\frac{r^2}{2} \arcsin \frac{x_{пj-1}}{r} + \frac{x_{пj-1}}{2} \sqrt{r^2 - x_{пj-1}^2} \right)^{k_{п2}}, \quad (5)$$

где r – радиус канала питателя.

Исходя из уравнения расхода через встроенный в рабочую секцию обратный клапан [8], с учётом давлений, указанных в расчётной схеме (рис. 2), давление в отводящей полости поршня определяется равенством

$$P_{4j} = P_{Tj} + \frac{\left(\frac{dx_{пj}}{dt} \times S_{пj} \right)^2}{(m_{щ} \times S_{щ})^2} \times \frac{r}{2} + \Delta P_{окj}, \quad (6)$$

где $m_{щ}$ – коэффициент расхода встроенного в рабочую секцию обратного клапана; $S_{щ}$ – площадь проходного сечения обратного клапана; $\Delta P_{окj}$ – потери давления в отводящем канале.

Площадь проходного сечения встроенного в рабочую секцию обратного клапана [8]

$$S_{щ} = \frac{p}{2} \times \left(d_{кк} + \frac{d_{кк} \times d_{щ}}{2 \times A} \right) \times \left(A - \frac{d_{щ}}{2} \right), \quad (7)$$

где $A = \sqrt{\frac{d_{кк}^2}{4} \times \left(p + \sqrt{\frac{d_{ш}^2 - d_{кк}^2}{4}} \right)^2}$, $d_{кк}$ – диаметр канала седла обратного клапана; $d_{щ}$ – диаметр шарового затвора обратного клапана.

Потери давления в подводящем $\Delta P_{пkj}$ и отводящем $\Delta P_{окj}$ каналах питателя, которые рассчитываются в виде суммы потерь давления по длине канала и потерь давления на местных сопротивлениях [6], для ламинарного потока рабочей жидкости с учётом урав-

нения неразрывности (сплошности) потока рабочей жидкости, можно определить по обобщённой формуле

$$\Delta P_j = 32 \times r \times n \times \frac{dx_{п}}{dt} \times \frac{d_{пj}}{d_{kj}} \times \sum \frac{L_{kj}}{d_{kj}^2} + \frac{r}{2} \times \left(\frac{dx_{п}}{dt} \times \frac{d_{пj}}{d_{kj}} \right)^2 \times \sum V, \quad (8)$$

где n – вязкость рабочей жидкости; $dx_{п}/dt$ – средняя скорость поршня; L_{kj} – длина канала; Z – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент, учитывающий вязкое трение, рассчитывается по формуле [8]:

$$I_{тпj} = \frac{r \times v}{e_{oj}} \times b_j \times l_j, \quad (9)$$

где e_{oj} – радиальный зазор между поршнем и проточкой, в которой он перемещается; b_j – ширина щели; l_j – длина щели.

Вследствие сложности учета всех процессов, происходящих при работе последовательного питателя, при моделировании введены следующие допущения:

- каждый дозирующе-распределительный поршень начинает двигаться только после того, как поршень, управляющий его перемещением, достигает своего крайнего положения и встаёт на упор;

- учитывается только возрастание входного давления в торцевой полости исследуемой рабочей секции вследствие перемещения управляющего поршня. При этом постепенность открытия выходного отверстия этим же управляющим поршнем не учитывается, так как в момент подачи давления к торцу очередного поршня канал, по которому смазочный материал вытесняется этим поршнем на выходное отверстие питателя, уже полностью открыт;

- противодействие на выходе рабочей секции, преодолеваемое поршнем при доставке смазочного материала, будет постоянным в течение всего пути его перемещения;

- в начальный момент времени все трубопроводы и каналы элементов смазочной системы заполнены смазочным материалом;

- так как проточки, выполненные по диаметру поршня любого размера, образуют одинаковые камеры, давление в которых со-

здают противоположно направленные взаимно компенсирующиеся силы одинаковой величины, то действие этих сил на перемещение поршня питателя не учитывается.

Математическая модель последовательного питателя состоит из взаимосвязанных математических моделей дозирующе-распределительных поршней питателя, описываемых уравнением (1).

Структурная схема модели последовательного питателя с шестью рабочими выходами, реализованная в системе Simulink, представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлена структурная схема модели движения дозирующе-распределительного поршня последовательного питателя, которая описывается системой уравнений (1) – (9).

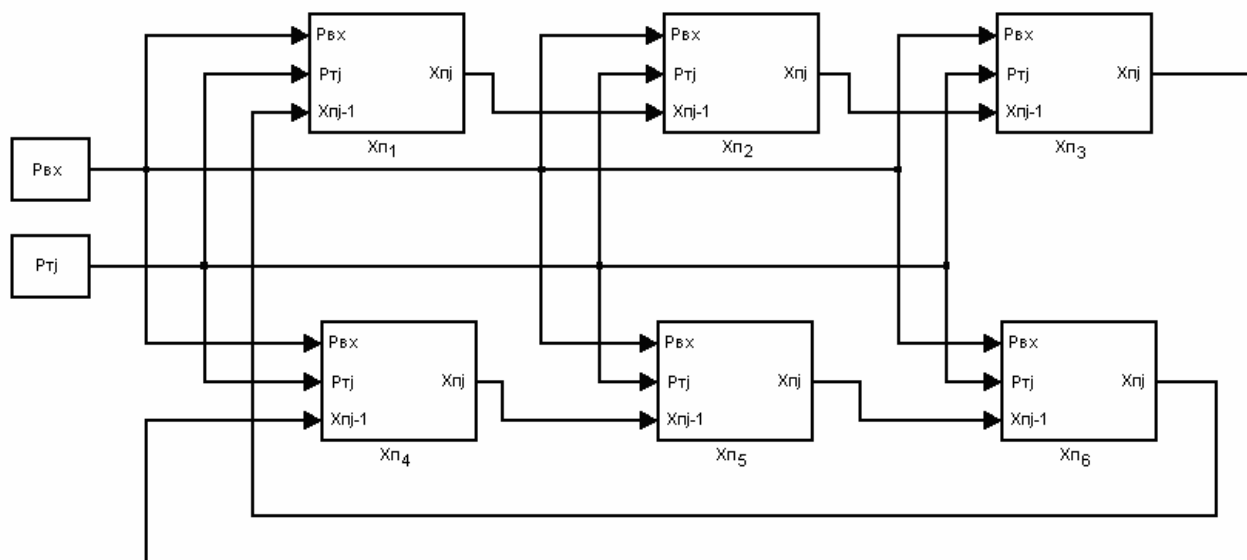


Рис. 3. Реализация математической модели последовательного питателя с шестью рабочими выходами в системе Simulink

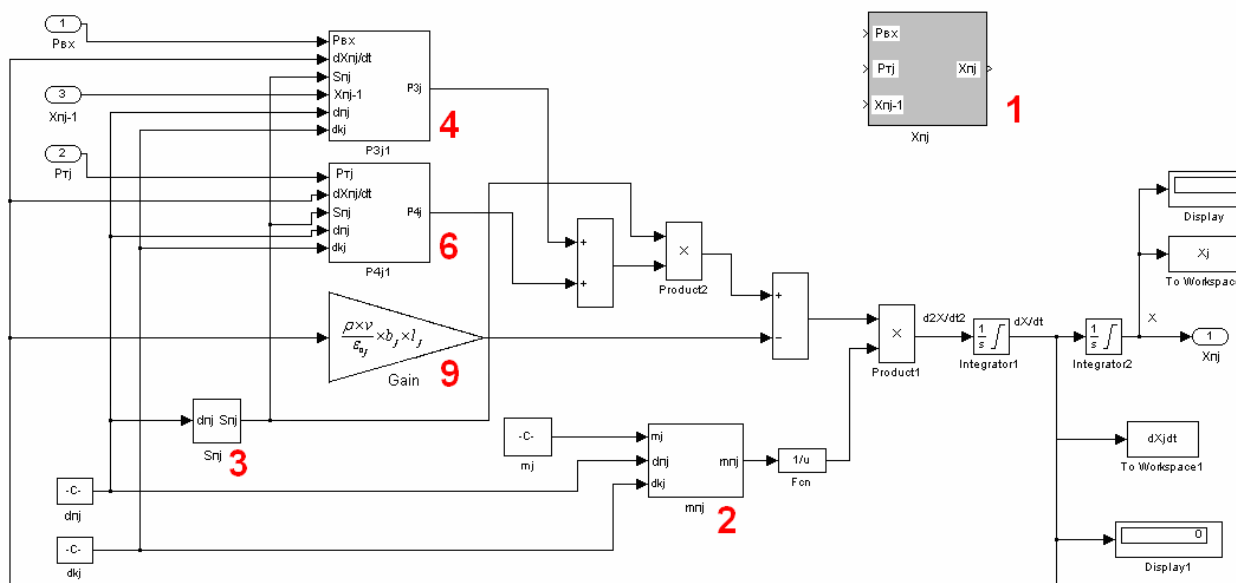


Рис. 4. Структурная схема модели движения дозирующе-распределительного поршня последовательного питателя в системе Simulink

При этом в макроблоках 2, 3, 4, 6, 9 (рис. 4) реализованы уравнения (2), (3), (4), (6) и (9) соответственно, уравнение (5) входит в состав макроблока 4, уравнение (7) - в состав макроблока 6, а уравнение (8) включено в макроблоки 4 и 6.

Структурная схема модели давления в отводящей полости поршня в соответствии с уравнением (6) представлена на рис. 5.

Адекватность представленной математической модели последовательного питате-

ля устанавливалась путем сравнения значений скорости перемещения поршня питателя при различных расходах, подаваемых на его вход, полученных экспериментальным путем [9], и в результате моделирования. Результаты сравнения представлены на графиках, приведенных на рис. 6, и в таблице 1.

На рис. 7 приведены графики последовательного перемещения поршней питателя MSP3-5T-5T-5T фирмы LUBROQUIP при раз-ной величине расхода и давления на входе в

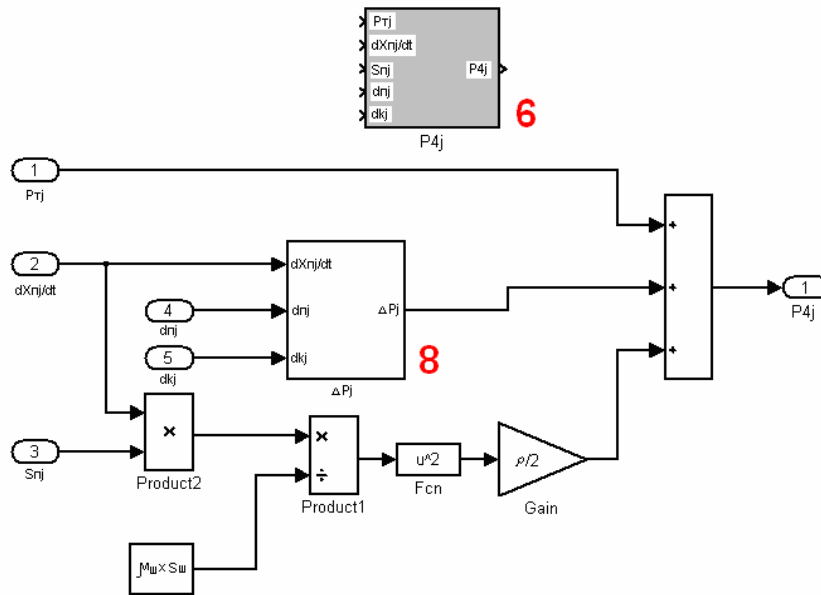


Рис. 5. Структурная схема модели давления в отводящей полости поршня в системе Simulink

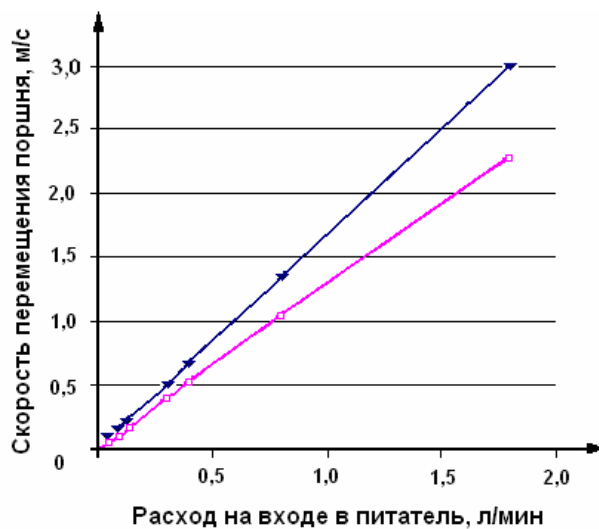


Рис. 6. Зависимость скорости перемещения дозирующе-распределительного поршня питателя серии MSP от величины расхода, подаваемого на его вход:

▼ – эксперимент; □ – расчет

Таблица 1. Сравнение результатов натурального и численного эксперимента

Расход на входе в питатель, л/мин	0,011	0,025	0,040	0,052	0,090	0,120	0,300	0,400	0,800	1,800
Давление на входе в питатель, МПа	2,60	2,50	2,50	2,00	4,00	4,50	3,60	4,50	4,50	4,75
Средняя скорость движения поршня – экспериментальные данные, м/с	0,019	0,048	0,062	0,090	0,161	0,226	0,505	0,677	1,340	3,008
Средняя скорость движения поршня – расчетные данные, м/с	0,014	0,033	0,052	0,068	0,118	0,157	0,392	0,522	1,039	2,280
Расхождение экспериментальных и расчетных данных, %	26,3	31,3	16,1	24,4	26,7	30,5	22,4	22,9	22,5	24,2

питатель и отсутствии противодействия на его выходах. Представленные графики наглядно иллюстрируют пример использования разработанной математической модели для определения времени цикла работы каждого питателя, а в итоге - и смазочной системы в целом, в том числе в зависимости от типоразмеров поршней питателей, величин расходов, подаваемых на их входные отверстия, и значений противодавлений на выходах питателей.

Использование математической модели

последовательного питателя даёт возможность на этапе проектирования смазочной системы с помощью численного эксперимента определить основные рабочие характеристики последовательных питателей различных типоразмеров, получить данные для диагностики состояния смазочной системы [10], выбрать оптимальные режимы ее работы и способы управления циклом смазывания, что позволит повысить надёжность и стабильность рабочих характеристик смазываемого оборудования.

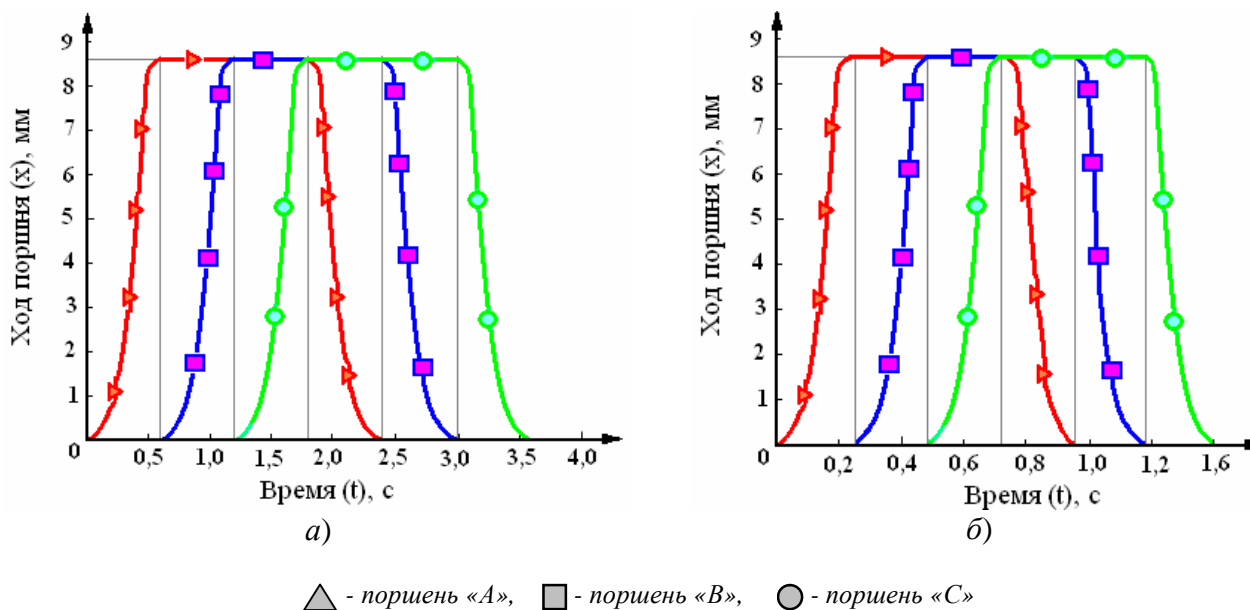


Рис. 7. Циклограмма работы поршней последовательного питателя MSP3-5T-5T-5T при отсутствии противодействия на его выходах:

а - $Q_{ex} = 0,011$ л/мин, $P_{ex} = 2,6$ МПа, время полного цикла работы питателя 3,6 с;
 б - $Q_{ex} = 0,025$ л/мин, $P_{ex} = 2,5$ МПа, время полного цикла работы питателя 1,6 с

Библиографический список

1. Рыбальченко, Д. Е, Царев, А. М. Автоматизированные системы смазывания на базе нагнетательного устройства с программируемой подачей в перекомпоновываемых производственных системах // Труды международной конференции «Автоматизация и производственный контроль». Секция «Автоматизация технологических процессов». – Тольятти, 2006.

2. Рыбальченко, Д. Е, Царев, А. М. Применение последовательных смазочных систем в производственных системах машин с автоматической сменой узлов и изменяющейся структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. - №1, 2007. - С. 45 – 53.

3. Рыбальченко, Д. Е. Адаптивное смазывание технологического оборудования [Текст] // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.6: Сборник трудов Второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 07-09.02.2006, СПб. / Под. ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко, В. Ф. Самохина. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2006. – С. 308 – 310.

4. Пат. 200273792 Российская Федерация, МПК⁷ F16N25/02. Нагнетательное устройство с программируемой подачей смазочного материала и централизованным контролем [Текст] / Рыбальченко Д. Е.; заявитель и патентообладатель ОАО «АВТОВАЗ» - № 2004116647/06; заявл. 01.06.2004; опубл. 10.04.2006. Бюл. №10 – 1 с.: ил.

5. Рыбальченко, Д. Е., Тархов, С. Ф.

Конструкция и принцип действия специальных устройств смазочной техники. Типовые схемные решения. [Текст] // Система автоматизированного обучения. Рукопись сборника. – М., 2001. – 99 с. - Деп. в РАО 04.09.01, №5047.

6. Пневматические и гидравлические приводы и системы [Текст]: в 2 т. Т. 2. Гидравлические приводы и системы. Основы: Учебное пособие / А. С. Наземцев, Д. Е. Рыбальченко. – М.: ФОРУМ, 2007. – 304 с.

7. Гимадиев, А. Г. Выбор параметров, расчёт статических и динамических характеристик регулятора расхода топлива. [Текст]: Учеб. пособие / Самарский государственный аэрокосмический университет. Самара, 2007. - 64 с.

8. Абрамов, Е. И., Колесниченко, К. А., Маслов, В. Т. Элементы гидропривода [Текст]: Справочник. - Киев: Техніка, 1969. - 319 с.

9. Рыбальченко, Д. Е. Экспериментальное исследование статических и динамических характеристик нагнетательного устройства с программируемой подачей смазочного материала [Текст] // Самар. госуд. аэрокосмич. ун-т. – Самара, 2008. – 18 с.: ил. 5.- Библ. 6 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 12.03.08, №204-В-2008.

10. Пат. 2319060 Российская Федерация, МПК⁷ F16N25/02. Способ диагностики автоматизированных последовательных смазочных систем [Текст] / Рыбальченко Д. Е.; заявитель и патентообладатель ОАО «АВТОВАЗ» - № 2006116827/06; заявл. 16.05.2006; опубл. 10.03.2008. Бюл. №7 – 1 с. : ил.

References

1. Rybaltchenko, D. Ye., Tsaryov, A. M. Automated lubrication systems based on a pump unit with programmable feed in production systems with layout modification//. Transactions of the International Conference «Automatization and industrial control» Section «Automatization of technological processes». – Togliatti, 2006.

2. Rybaltchenko, D. Ye., Tsaryov, A. M. The use of sequential lubrication systems in industrial systems of machines with automatic

unit replacement and changeable structure.// Mechatronics, automatization, control. No. 1, 2007, pp. 45-53.

3. Rybaltchenko, D. Ye. Adaptive lubrication of production equipment // High technologies, fundamental and applied research, education. Transactions of the Second international scientific-and-practical conference «Analysis, development and use of high technologies in industry». 07-09.02.2006, Saint Petersburg / Edited by A. P. Kudinov,

G. G. Matvienko, V. F. Samokhin. – Saint Petersburg: Polytechnical University Publishing House. – 2006 – pp. 308-310.

4. Patent 200273792 Russian Federation, International Patent Classification. Pump unit with programmable feed of lubrication material and centralized control / Rybaltchenko D. Ye.; applicant and patent holder – joint stock company «Avtovaz» - No 2004116647/06; application 01.06.2004; published 10.04.2006. Bul. No. 10-1 p.: ill.

5. Rybaltchenko, D. Ye., Tarkhov, S. F. Construction and operation principle of special lubrication devices. Standard designs. // System of computer-aided instruction. Collection manual. – Moscow, 2001-99 pp. – Dep. at Russian Academy of Education. No. 5047.

6. Pneumatic and hydraulic drives and systems: in 2 volumes. Volume 2. Hydraulic drives and systems. Foundations: Teaching aid /

A. S. Nazemtsev, D. Ye. Rybaltchenko. – Moscow, Forum, 2007 – 304 pp.

7. Gimadiyev, A. G. Choice of parameters, analysis of full consumption regulator static and dynamic characteristics: Teaching aid / Samara State Aerospace University, Samara, 2007-64 pp.

8. Abramov, Ye. I., Kolesnitchenko, K. A., Maslov, V. T. Hydrodrive elements: Reference book. – Kiev.: Tekhnika, 1969-319 pp.

9. Rybaltchenko, D. Ye. Experimental analysis of static and dynamic characteristics of a pump unit with programmable feed of lubrication material. // Samara State Aerospace University. – Samara, 2008-18 pp.: M.5 – Bibl. 6 name – Rus. - Dep at.

10. Patent 2319060 Russian Federation, A way of diagnosing automated lubrication systems / Rybaltchenko, D. Ye.; applicant and patent holder-joint-stock company «Avtovaz» - No. 2006116827/06; application 16.05.2006; published 10.03.2008. Bul. No. 7-1 p.: ill.

MATHEMATICAL MODEL OF SEQUENTIAL FEEDERS FOR CENTRALIZED LUBRICATION SYSTEMS

© 2008 D. Ye. Rybaltchenko¹, Ye. V. Shakhmatov², G. O. Belov², V. N. Ilyukhin²

¹Public joint-stock company «Avtovaz», Togliatti

²Samara State Aerospace University

The paper presents a system of differential and algebraic equations governing the operation of a sequential feeder. The block diagram of realization of equations that constitute a mathematical model of a sequential feeder is given. It allows making analysis of operating characteristics of sequential feeders and lubrication systems based on them in the Simulink system of modelling dynamic processes. The results of full-scale tests which confirm the adequacy of the mathematical model developed are presented.

Mathematical modeling, dynamics, designing, lubrication systems, sequential feeder, friction

Информация об авторах

Рыбальченко Дмитрий Евгеньевич, начальник отдела внедрения и сопровождения САПР производства технологического оборудования ОАО «АВТОВАЗ». Область научных интересов: динамика гидравлических систем, проектирование гидропневмоприводов смазочных и охлаждающих систем.

Шахматов Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям СГАУ. Область научных интересов: динамика трубопроводных систем. Виброакустика. Виброакустическое взаимодействие элементов машин.

Белов Глеб Олегович, студент СГАУ. Область научных интересов: гидроавтоматика.

Илюхин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ. Область научных интересов: динамика гидравлических и пневматических систем, испытания и эксплуатация гидропневмосистем, цифровые регуляторы давления и расхода.

Rybaltchenko Dmitry Yevgenievitch, head of department of technical equipment production at the «AvtoVAZ» joint-stock company. Area of research: dynamics of hydraulic systems, designing of hydropneumodrives of lubrication and cooling systems.

Shakhmatov Yevgeny Vladimirovitch, Doctor of Technical Science, Deputy Rector for Science and Innovations, SSAU. Area of research: dynamics of pipelines. Vibroacoustics. Vibroacoustic interaction of machine elements.

Belov Gleb Olegovitch, student, SSAU. Area of research: hydroautomation.

Ilyukhin Vladimir Nikolayevitch, Candidate of Technical Science, assistant of the department of automatic system of power engineering installations, SSAU. Area of research: dynamics of hydraulic and pneumatic systems, testing and maintenance of hydropneumodrives, digital pressure-and-consumption regulators.

УДК 621.365.2

МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ ГРУППЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

© 2008 А. В. Салтыков

Самарский государственный технический университет

Разработан метод расчёта электрических и рабочих характеристик любого количества параллельных ДСП за счёт приведения сопротивлений печных контуров параллельных ДСП к шинам высокого напряжения и использования метода наложения. Показано, что для определения суммарного рабочего тока параллельных ДСП в СЭС могут быть использованы способ сложения последовательно-параллельных сопротивлений группы ДСП и способ сложения рабочих токов ДСП по теореме “косинусов”. Выявлено, что определение суммарного рабочего тока параллельных ДСП простым сложением рабочих токов приводит к несущественным погрешностям.

Параллельные дуговые сталеплавильные печи, метод расчёта токов, сопротивление печного контура

Электроснабжение группы параллельных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) имеет ряд принципиальных особенностей, обусловленных, в первую очередь, взаимным влиянием переменных режимов работы ДСП друг на друга и сложным, как правило, случайным характером воздействия мощной резкопеременной нагрузки ДСП на систему электроснабжения (СЭС), ограничиваемой нагрузкой силового электрооборудования, показателями качества электроэнергии и в целом электромагнитной совместимостью с СЭС [1].

Особенностью режимов ДСП является их возможность работы на различных ступенях печного трансформатора, т.е. с различными коэффициентами трансформации, а также разнообразие значений уставок тока дуги ДСП, задаваемых при неизменном коэффициенте трансформации печного трансформатора.

Однако недостаток, связанный с различием коэффициентов трансформации печных трансформаторов (ПТ), а, следовательно, и их сопротивлений, может быть устранён приведением сопротивлений печных контуров, параллельных ДСП, к шинам высшего напряжения, т.е. к шинам общего напряжения их питания от СЭС $U_{шсх}$, по выражениям (для двух параллельных ДСП):
для ДСП № 1:

$$\underline{Z}_{1K,1} = R_{K1} \cdot K_{ПТ1}^2 + jX_{K1} \cdot K_{ПТ1}^2; \quad (1)$$

для ДСП № 2:

$$\underline{Z}_{1K,2} = R_{K2} \cdot K_{ПТ2}^2 + jX_{K2} \cdot K_{ПТ2}^2; \quad (2)$$

где R_{K1} , R_{K2} – активные сопротивления печного контура на стороне низкого напряжения ДСП № 1 и № 2; X_{K1} , X_{K2} – индуктивные сопротивления печного контура на стороне низкого напряжения ДСП № 1 и № 2;

$\underline{Z}_{1K,1}$, $\underline{Z}_{1K,2}$ – полные комплексные сопротивления печного контура на стороне высокого напряжения ДСП № 1 и № 2; $K_{ПТ1}$, $K_{ПТ2}$ – коэффициенты трансформации печных трансформаторов ДСП № 1 и № 2.

Для параллельных цепей печных контуров определяется полное комплексное суммарное сопротивление для режимов эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) в общей точке подключения ДСП № 1 и № 2 по выражениям

$$\underline{Z}_{1K,\Sigma} = R_{1K,\Sigma} + jX_{1K,\Sigma}, \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{1K,\Sigma}$ – полное комплексное суммарное сопротивление параллельных печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ; $R_{1K,\Sigma}$ – активное суммарное сопротивление параллельных

печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ; $X_{1K,\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление параллельных печных контуров ДСП № 1 и № 2 при ЭКЗ.

По параметрам суммарных сопротивлений печных контуров ДСП №1 и №2 находится общий ток эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) группы ДСП на стороне высокого напряжения по выражению

$$I_{1K,S} = \sqrt{\left(\frac{Z_{1K,S} \cdot S_{K3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot b \cdot X_{1K,S} \cdot U_{ИСХ}} \right)^2 + \frac{S_{K3}}{3 \cdot b \cdot X_{1K,S}} - \frac{Z_{1K,S} \cdot S_{K3}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot b \cdot X_{1K,S} \cdot U_{ИСХ}}}, \quad (4)$$

где b – коэффициент потерь мощности в СЭС; $Z_{1K,\Sigma}, X_{1K,\Sigma}$ – суммарные полное (по модулю) и индуктивное сопротивления параллельных печных контуров ДСП №1 и №2; $U_{ИСХ}$ – исходное напряжение на стороне высокого напряжения питания параллельных ДСП №1 и №2; S_{K3} – мощность короткого замыкания на шинах питания параллельных ДСП №1 и №2.

Напряжение на стороне высокого напряжения питания параллельных ДСП №1 и №2 для режима ЭКЗ определяется по выражению

$$U_{1K,\Sigma} = \sqrt{3} \cdot I_{1K,\Sigma} \cdot Z_{1K,\Sigma}, \quad (5)$$

а токи эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) для каждой из параллельных ДСП – по выражениям

$$а) \text{ для ДСП № 1: } I_{1K,1} = \frac{U_{1K,\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K,1}}, \quad (6)$$

$$б) \text{ для ДСП №2: } I_{1K,2} = \frac{U_{1K,\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K,2}}. \quad (7)$$

С учётом принятых относительных значений m_1 и m_2 определяются рабочие токи для каждой из параллельных ДСП по выражениям

$$а) \text{ для ДСП № 1: } I_{1раб,1} = m_1 \cdot I_{1K,1}, \quad (8)$$

$$б) \text{ для ДСП №2: } I_{1раб,2} = m_2 \cdot I_{1K,2}, \quad (9)$$

где m_1 – коэффициент пропорциональности принятого рабочего тока $I_{1раб,1}$ для ДСП № 1 к собственному току ЭКЗ $I_{1K,1}$; m_2 – коэффициент пропорциональности принятого рабочего тока $I_{1раб,2}$ для ДСП № 2 к собственному току ЭКЗ $I_{1K,2}$.

Затем определяются индуктивные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 – $X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ по выражениям

$$X_{1раб,1} = X_{1K,1} \sqrt[3]{\frac{1}{m_1}}, \quad (10)$$

$$X_{1раб,2} = X_{1K,2} \sqrt[3]{\frac{1}{m_2}}. \quad (11)$$

По вычисленным значениям $I_{1раб,1}, I_{1раб,2}, X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ может быть определено значение рабочего напряжения на шинах питания группы параллельных ДСП по выражению

$$U_{1раб} = \frac{U_{ИСХ} [S_{K3} - 3 \cdot b (I_{1раб,1}^2 \cdot X_{1раб,1} + I_{1раб,2}^2 \cdot X_{1раб,2})]}{S_{K3}}. \quad (12)$$

По значениям $I_{1раб,1}, I_{1раб,2}, X_{1раб,1}, X_{1раб,2}$ могут быть также определены реактивные мощности $Q_{1раб,1}$ и $Q_{1раб,2}$, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 по выражениям

$$Q_{1раб,1} = 3 \cdot I_{1раб,1}^2 \cdot X_{1раб,1}, \quad (13)$$

$$Q_{1раб,2} = 3 \cdot I_{1раб,2}^2 \cdot X_{1раб,2}. \quad (14)$$

При этом рабочее напряжения на шинах питания ДСП, определяемое нагрузкой в рабочем режиме параллельных ДСП №1 и ДСП №2, рассчитывается по выражению

$$U_{1раб} = \frac{U_{ИСХ} [S_{K3} - b(Q_{1раб,1} + Q_{1раб,2})]}{S_{K3}}. \quad (15)$$

На основании выражений (12) или (15) определяются полные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 по выражениям

$$\text{для ДСП № 1: } Z_{1раб,1} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot I_{1раб,1}}, \quad (16)$$

$$\text{для ДСП № 2: } Z_{1раб,2} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot I_{1раб,2}}, \quad (17)$$

а активные сопротивления, соответствующие собственным рабочим токам, для каждой из параллельных ДСП № 1 и №2 - по выражениям

$$\text{для ДСП № 1: } R_{1раб,1} = \sqrt{Z_{1раб,1}^2 - X_{1раб,1}^2}, \quad (18)$$

$$\text{для ДСП № 2: } R_{1раб,2} = \sqrt{Z_{1раб,2}^2 - X_{1раб,2}^2}. \quad (19)$$

Для определения суммарного рабочего тока в СЭС (в обмотке силового трансформатора ГПП) могут быть использованы два способа:

а) способ сложения последовательно-параллельных сопротивлений ДСП №1 и ДСП №2

$$Z_{1раб\Sigma} = Z_{1раб1} // Z_{1раб2}; \quad (20)$$

с выполнением вычислений по выражениям, аналогичным (1) – (3), и по выражению

$$I_{1раб\Sigma} = \frac{U_{1раб}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1раб\Sigma}}; \quad (21)$$

б) способ сложения рабочих токов ДСП №1 – $I_{1раб,1}$ и ДСП №2 – $I_{1раб,2}$ по теореме “косинусов” [2].

Для применения теоремы “косинусов” необходимо определение фазовых углов между рабочим током соответствующей ДСП и рабочим напряжением на шинах питания группы ДСП.

Для решения этой задачи вычисляются падения напряжения U_{1R}, U_{1X} на активных и индуктивных сопротивлениях печного контура параллельных дуговых сталеплавильных печей:

для рабочего режима ДСП №1:

$$U_{1R,раб,1} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,1} \cdot R_{1раб,1}, \quad (22)$$

$$U_{1X,раб,1} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,1} \cdot X_{1раб,1}, \quad (23)$$

для рабочего режима ДСП №2:

$$U_{1R,раб,2} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,2} \cdot R_{1раб,2}, \quad (24)$$

$$U_{1X,раб,2} = \sqrt{3} \cdot I_{1,раб,2} \cdot X_{1раб,2}, \quad (25)$$

а затем определяются фазовые сдвиги рабочих токов ДСП по выражениям для ДСП №1:

$$f_{раб,1}^0 = \arctg \frac{U_{1X,раб,1}}{U_{1R,раб,1}}, \quad (26)$$

для ДСП №2:

$$f_{раб,2}^0 = \arctg \frac{U_{1X,раб,2}}{U_{1R,раб,2}}. \quad (27)$$

Найденные по приведённым формулам фазовые углы позволяют вычислить суммарный ток от группы параллельных ДСП по выражению

$$I_{1раб\Sigma} = \sqrt{I_{1раб,1}^2 + I_{1раб,2}^2 - 2 \cdot I_{1раб,1} \cdot I_{1раб,2} \cdot \cos[180^\circ - (f_1^0 - f_2^0)]} \quad (28)$$

и построить векторные диаграммы токов и падений напряжения для рабочих режимов ДСП на любых ступенях печных трансформаторов (ПТ) и для соответствующих значений относительных рабочих токов m_1 и m_2 .

Вычисленные значения падений напряжения и рабочие токи ДСП-40 №1 и ДСП-40 №2 для ряда значений m и ряда ступеней ПТ при их параллельном подключении сведены в таблицу 1, а изменения суммарных значений токов параллельных ДСП на общих шинах их питания показаны в таблице 2.

Таблица 1. Падения напряжений и рабочие токи ДСП-40 №1 и ДСП-40 №2 для ряда значений m и ряда ступеней ПТ при их параллельном подключении

ДСП-40 №1						ДСП-40 №2					
Ступень	m_1	$U_{1R,раб,1}$ кВ	$U_{1X,раб,1}$ кВ	$I_{1раб,1}$ кА	$f_{раб,1}$ град	ступень	m_2	$U_{1R,раб,2}$ кВ	$U_{1X,раб,2}$ кВ	$I_{1раб,2}$ кА	$f_{раб,2}$ град
1	0,63	7,325	6,297	0,917	40,69	1	0,63	7,325	6,297	0,917	40,69
1	0,63	7,573	6,297	0,917	39,75	1	0,44	8,51	4,957	0,641	30,22
1	0,63	7,324	6,385	0,927	40,99	2	0,63	7,332	6,355	0,796	40,92
1	0,63	7,542	6,365	0,927	40,16	2	0,44	8,506	5,003	0,556	30,46
1	0,63	7,322	6,422	0,935	41,25	3	0,63	7,337	6,405	0,694	41,12
1	0,63	7,515	6,422	0,935	40,52	3	0,44	8,503	5,042	0,485	30,67
1	0,63	7,319	6,513	0,949	41,66	5	0,63	7,355	6,472	0,538	41,34
1	0,63	7,471	6,513	0,949	41,08	5	0,44	8,502	5,095	0,376	30,93
1	0,63	7,317	6,568	0,957	41,91	7	0,63	7,397	6,478	0,446	41,21
1	0,63	7,444	6,568	0,957	41,42	7	0,44	8,518	5,099	0,311	30,91

Таблица 2. Изменение значений суммарных токов параллельных ДСП-40

Ступень ДСП №1	Ступень ДСП №2	$\Delta j_{раб} = j_{раб,1} - j_{раб,2}$	$U_{1раб}$	$I_{1,раб\Sigma}$	$I_{1,раб\Sigma} = I_{1раб,1} + I_{1раб,2}$
1	1	0	9,66	1,835	1,835
1	1	9,53	9,849	1,553	1,558
1	2	0,07	9,703	1,723	1,723
1	2	9,7	9,868	1,478	1,483
1	3	0,13	9,739	1,630	1,63
1	3	9,85	9,885	1,416	1,42
1	5	0,32	9,797	1,487	1,487
1	5	10,15	9,911	1,320	1,325
1	7	0,7	9,833	1,402	1,403
1	7	10,51	9,927	1,264	1,268

Векторные диаграммы общего рабочего напряжения на шинах питания ДСП $U_{1раб}$, суммарного тока $I_{1раб,\Sigma}$, токов и падений напряжения для двух параллельных ДСП-40 представлены на рис. 1...4.

Для построения векторных диаграмм были выбраны значения рабочих токов ДСП-40: при $m = 0,63$, характеризующих режим максимальной производительности ДСП, и при $m = 0,44$, характеризующих режим минимального удельного расхода электроэнергии ДСП, т.е. значения m , отражающие границы рациональных рабочих режимов ДСП-40.

Практический интерес, как показано в табл. 1, представляет то обстоятельство, что при разных величинах рассмотренных относительных значений токов m параллельных ДСП и при их работе на разных ступенях трансформации печного трансформатора угловой сдвиг между рабочими токами ДСП-40, составляющий $\Delta j_{раб} = j_{раб,1} - j_{раб,2} = 0...10,5^0$, не приводит к существенным погрешностям при определении суммарного тока группы ДСП простым сложением рабочих токов параллельных ДСП:

$$I_{1раб\Sigma} \cong I_{1раб,1} + I_{1раб,2} \quad (29)$$

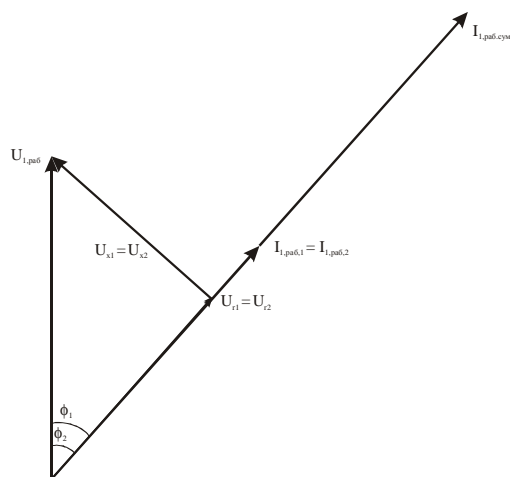


Рис. 1. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 1, $m_1 = 0,63$)

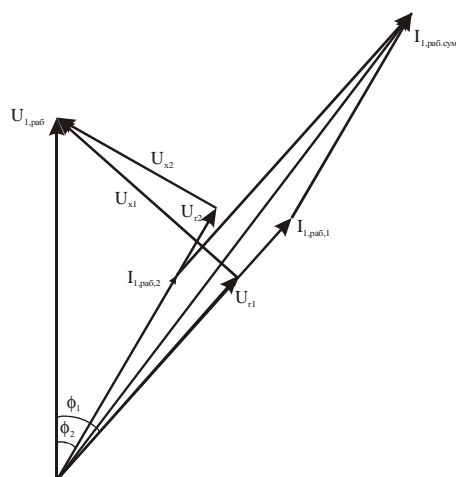


Рис. 2. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 1, $m_1 = 0,44$)

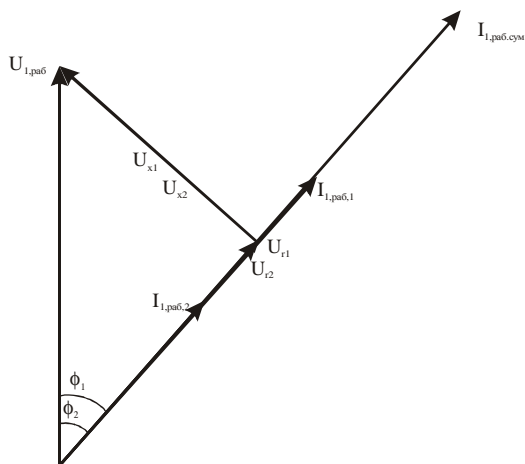


Рис 3. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 5, $m_1 = 0,63$)

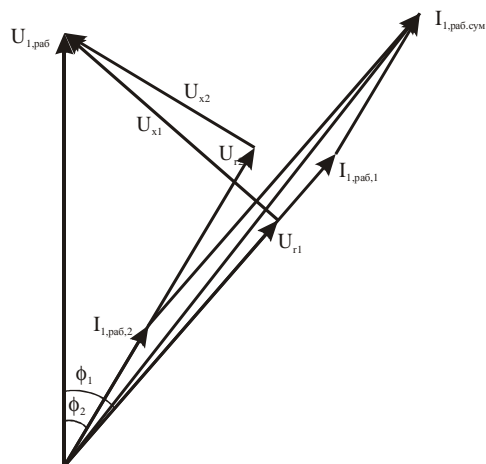


Рис 4. Векторная диаграмма суммарного тока $I_{1,раб,S}$, токов, падений напряжения: для ДСП №1 (ступень 1, $m_1 = 0,63$) и ДСП №2 (ступень 5, $m_1 = 0,44$)

Подобное упрощение при определении суммарного тока от группы параллельных ДСП приводит к незначительной погрешности, которая не превышает 0,4 %.

Дальнейшие расчеты при подключении дополнительных параллельных ДСП выполняются методом наложения, т.е. когда предыдущие параллельные ДСП представляются эквивалентными (суммарными) сопротивле-

ниями и т.д.

Разработанный метод позволяет определять электрические и рабочие характеристики любого количества параллельных ДСП, работающих как на одинаковых, так и различных ступенях печных трансформаторов [3]. Одновременно могут быть определены уровни и отклонения напряжения на общих шинах питания параллельных ДСП.

Библиографический список

1. Салтыков, В. М. Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения / В. М. Салтыков, О. А. Салтыкова, А. В. Салтыков. – М.: Энергоатомиздат, 2006.
2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев – М.: Наука, 1965.
3. Салтыков, А. В. Рациональные режимы параллельных дуговых сталеплавильных печей и их электромагнитная совместимость с системой электроснабжения / А. В. Салтыков – М.: Энергоатомиздат, 2007.

References

1. V.M. Saltykov, O.A. Saltykova, A.V. Saltykov. Influence of electric arc steel melting furnace characteristics on the quality of voltage in power supply system / Moscow: Energoatomizdat, 2006.
2. I. N. Bronshtein, K. A. Semendyaev. Mathematics reference book for engineers and students of technical universities / Moscow: Nauka (Science), 1965.
3. A. V. Saltykov. Rational conditions of parallel electric arc steel melting furnaces and their electromagnetic compatibility with an electric power supply system. – Moscow: Energoatomizdat, 2007.

**METHOD OF CALCULATING CURRENTS OF A GROUP
OF PARALLEL ELECTRIC ARC STEEL MELTING FURNACES**

© 2008 A. V. Saltykov

Samara State Technical University

The paper presents a method of calculating electrical and operating characteristics of any number of parallel EASMFs due to the reduction of furnace circuit resistances to high-voltage buses and the use of the method of superposition. It is shown that in order to determine the combined operating current of parallel EASMFs at the method of adding series-parallel resistances of a group of EASMFs and the method of EASSF operating currents according to the cosine law can be used. It has been found that determining the combined operating current of parallel EASMFs by simple adding of operating currents leads to insignificant errors.

Parallel electric arc steel smelting furnaces, method of calculating currents, furnace circuit resistance

Информация об авторе

Салтыков Александр Валентинович. Самарский государственный технический университет. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Saltykov, Alexander Victorovitch. Samara State Technical University. Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Automated Electrical Power Engineering Systems.

УДК 539.3

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ С НЕСКВОЗНЫМ РАЗРЕЗОМ-ТРЕЩИНОЙ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПО СХЕМАМ ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

© 2008 С. Л. Степанов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Формулируется упругопластическая задача о растяжении тонкой пластины с несквозным (поверхностным) разрезом. Процесс пластического деформирования материала как на всей длине разреза, так и в пластических зонах у его вершин моделируется по схемам жёсткопластического течения, что позволяет учитывать изменение геометрии пластины по толщине вблизи несквозного разреза и на его длине. Получено решение интегрального уравнения Фредгольма в квадратурах и построена процедура для определения численных результатов. В явном виде определена зависимость раскрытия берегов разреза от толщины пластины и глубины. Раскрытие берегов разреза используется в качестве деформационного критерия разрушения.

Разрез-трещина, пластическая деформация, упругопластическая задача, объёмная плотность, энергия диссипации, критерий разрушения, интегральное уравнение.

В настоящее время значительный интерес представляют задачи механики разрушения для образцов и элементов конструкций, находящихся в плоском напряжённом состоянии, с различными дефектами, возле которых возникают соизмеримые с ними по размерам области больших пластических деформаций. Это связано с широким использованием в тонкостенных конструкциях и оболочках летательных аппаратов материалов, обладающих хорошими деформационными свойствами и достаточно высокой пластичностью, а также с высоким уровнем эксплуатационных нагрузок.

С другой стороны, задача о разрушении пластины из упругопластического материала, находящейся в плоском напряжённом состоянии и имеющей несквозной трещиновидный дефект, имеет более общий характер и представляет больший практический интерес, чем задача о сквозной трещине. Это объясняется тем, что в тонкостенных конструкциях и оболочках, будь то фюзеляж самолёта или топливные баки ракет, всегда существуют повреждения, имеющие технологический характер или возникающие в результате внешних воздействий, и в процессе эксплуатации трансформирующиеся в царапины. В свою очередь, в зависимости от уровня внешних нагрузок такие царапины могут

как прорасти в сквозные трещины, так и сразу вызвать разрушение конструкции. Определение соответствующих предельных состояний в постановке Дагдейла рассмотрено в работе [1].

В настоящей работе, в отличие от [1], краевые условия для задачи о растяжении тонкой упругопластической пластины с несквозным разрезом-трещиной формулируются на основании представления процесса деформирования материала по толщине на длине этого разреза и в пластических зонах по схемам жёсткопластического течения. На длине царапины $2l$ деформирование материала происходит по схеме несимметричного жёсткопластического течения, рассмотренного в [2] и приведённого на рис. 1. Здесь h – толщина пластины, a – глубина несквозной трещины, v – скорость смещения верхнего и нижнего концов пластины, u – скорость прорастания несквозного разреза-трещины в глубину (движение т. О к т. О').

Область $A'O'B'$ движется как жёсткое целое по направлению к т. О со скоростью v . Пластические деформации локализуются вдоль изолированных линий скольжения $A'O'$ и $B'O'$, которые являются линиями разрыва скоростей перемещений. При пересечении этих линий частицами материала происходит скачкообразное увеличение деформаций и их

локализация в заштрихованных областях.

Мерой этих деформаций можно выбрать первое главное значение тензора конечных деформаций Альманси E_1 или, согласно [2], эквивалентный энергетический критерий, использующий имеющую физический смысл величину объёмной плотности энергии диссипации W , получаемой материальной частицей при пересечении линии разрыва скоростей перемещений:

$$\max W \geq W_* \quad (1)$$

Тогда скорость прорастания несквозного разреза-трещины определится следующим образом:

$$u = v \left(\frac{2}{\bar{W}_*} - 1 \right), \quad (2)$$

где \bar{W}_* – критическое значение относительной объёмной плотности энергии диссипации $\bar{W}_* = W_* / k$, k – предел текучести материала на сдвиг, v – смещение берегов несквозной трещины в единицу времени.

Несквозной разрез прорастает на всю глубину при $v + u = h - a$, когда т. О выйдет на тыльную поверхность $A'B'$. Составив уравнение равновесия для полосы с учётом (2), получим

$$P \cdot h = 2k (h - a - v - u) = S_s \left(h - a - \frac{2v}{\bar{W}_*} \right), \quad (3)$$

где P – усилие, растягивающее полосу; S_s – предел текучести.

На рис. 2 представлена схема симметричного жёсткопластического течения, моделирующая деформирование материала пластины в пластических зонах у вершин несквозной трещины. Процесс деформирования происходит аналогично рассмотренному выше, но в отличие от последнего внутренняя трещина $O'O''$, вершины которой движутся в разные стороны со скоростью u , выйдет на свободные поверхности $A'B'$ и $C'D'$ при $v + u = h/2$. Уравнение равновесия для симметричного течения выглядит следующим образом:

$$P \cdot h = 2k (h - 2u - 2v) = S_s \left(h - \frac{4v}{\bar{W}_*} \right). \quad (4)$$

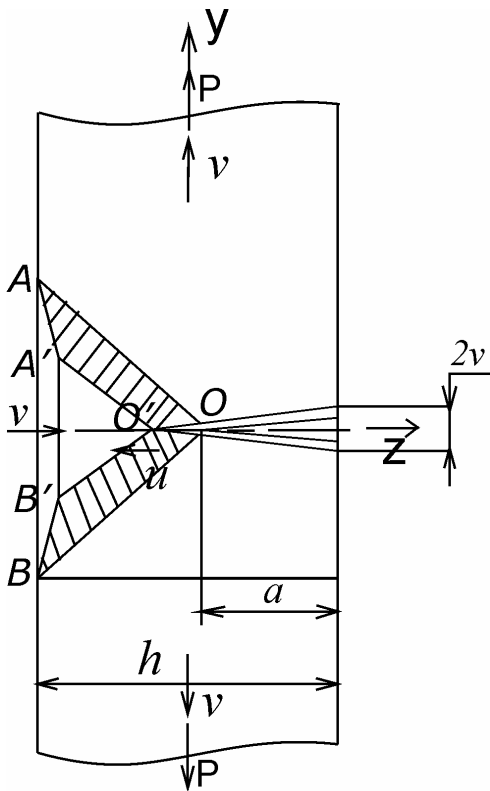


Рис. 1. Схема несимметричного жёсткопластического течения

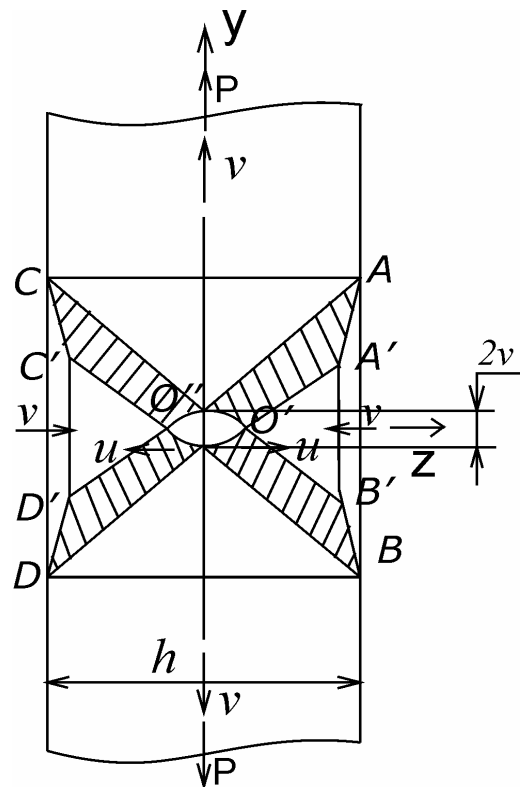


Рис. 2. Схема симметричного жёсткопластического течения

Полученные уравнения используем в качестве граничных условий для задачи о бесконечной пластине толщиной h с центральным несквозным разрезом глубиной a и длиной $2l$, растягиваемым на бесконечности усилиями P (рис. 3; сечению А-А соответствует рис. 1; смещению В-В соответствует рис. 2).

На линии несквозного разреза реализуется несимметричное жёсткопластическое течение. Тогда, используя (3), получим выражение для определения $p_1(x)$:

$$p_1(x) = s_s \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{2v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right). \quad (5)$$

В пластических зонах при $l \leq |x| \leq c$ действуют сжимающие усилия $p_2(x)$:

$$p_2(x) = s_s \left(1 - \frac{4v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right). \quad (6)$$

Решение упругой задачи с граничными условиями (5) и (6) будем искать путём суперпозиции двух решений, первое из которых – для однородного растяжения пластины без несквозного разреза, второе – для раз-

реза с приложенными на его берегах напряжениями, исчезающими на бесконечности. Поскольку первое решение не даёт вклада в концентрацию напряжений, рассмотрим только второе состояние, для которого на основании (5) и (6) запишем следующие граничные условия:

$$p(x) = \begin{cases} -P + s_s \left(1 - \frac{a}{h} - \frac{2v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right) & |x| \leq l; \\ -P + s_s \left(1 - \frac{4v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right) & l \leq |x| \leq c; \\ v(x) = 0, & |x| \geq c. \end{cases} \quad (7)$$

где $v(x)$ – смещения берегов разреза.

Исходя из физического смысла задачи, на величину P следует наложить следующие ограничения:

1) поскольку рассматривается идеальный упругопластический материал, то $P \leq s_s$;

2) берега несквозного разреза не должны контактировать и тем более перекрывать друг друга. Поэтому $P \geq s_s \left(1 - \frac{a}{h} \right)$.

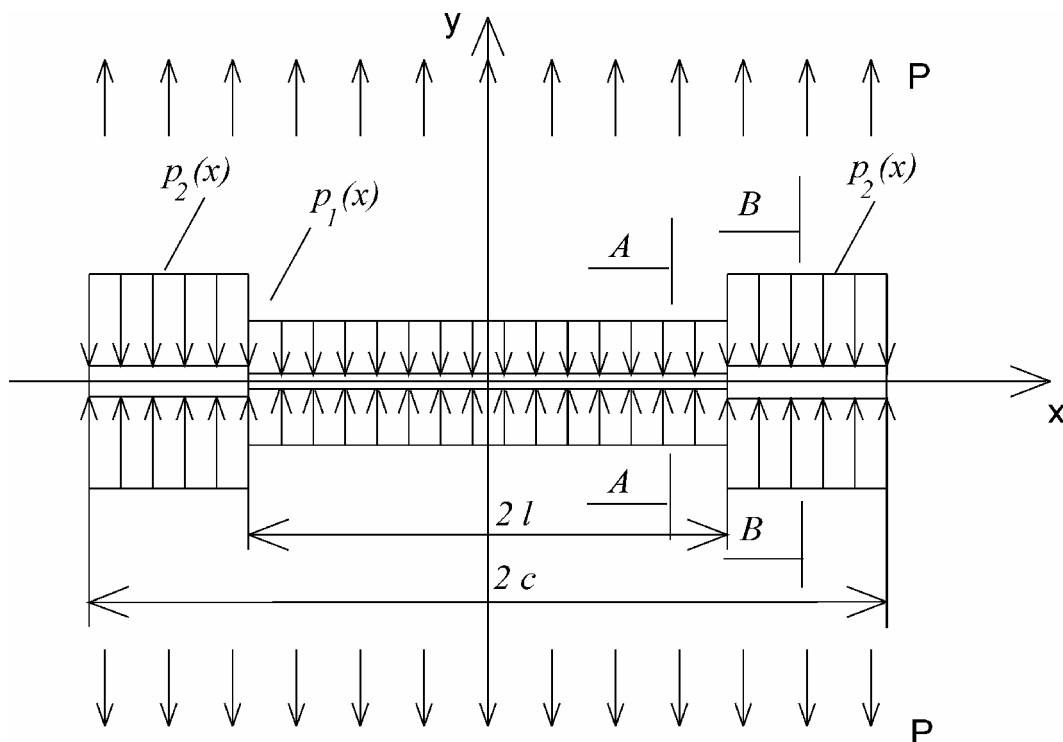


Рис. 3. Граничные условия для несквозного разреза

В полученной задаче (7) на оси x касательные напряжения S_{xy} равны нулю. В этом случае перемещения и напряжения могут быть выражены через одну аналитическую функцию комплексного переменного по формулам Колосова-Мусхелишвили. Не останавливаясь на подробностях ее отыскания (см., например, [3], [4]), сразу выпишем решение в наиболее удобном для дальнейшего исследования виде:

$$v(x) = \frac{1}{pE} \int_{-c}^c p(x) \Gamma(c, x, x) dx, \quad |x| < c;$$

$$s(x) = \frac{1}{2p \sqrt{x^2 - c^2}} \int_{-c}^c \frac{p(x) \sqrt{c^2 - x^2}}{x - x} dx, \quad |x| \geq c. \quad (8)$$

Подставив граничные условия (7) в первое уравнение (8) и проведя некоторые преобразования, получим неоднородное уравнение Фредгольма второго рода относительно смещений берегов разреза $v(x)$:

$$v(x) - I \frac{2}{h} \left[\int_{-c}^c v(x) \Gamma(c, x, x) dx + \left(\int_{-c}^{-l} + \int_l^c \right) v(x) \Gamma(c, x, x) dx \right] = f(x). \quad (9)$$

Здесь

$$\Gamma(c, x, x) = \ln \frac{c^2 - x^2 + \sqrt{(c^2 - x^2)(c^2 - x^2)}}{c^2 - x^2 - \sqrt{(c^2 - x^2)(c^2 - x^2)}};$$

$$f(x) = \frac{s_s}{pE} \left\{ \left(1 - \frac{P}{s_s} \right) \int_{-c}^c \Gamma(c, x, x) dx - \frac{a}{h} \int_{-l}^l \Gamma(c, x, x) dx \right\};$$

$$I = \frac{s_s}{p \bar{W}_* \cdot E}, \quad (10)$$

где E – модуль упругости.

К уравнению (9) для определения величины «с» необходимо присоединить условие плавности смыкания берегов пластических зон или эквивалентное условие конечности напряжений:

$$\lim_{x \rightarrow c} \frac{dv(x)}{dx} = 0. \quad (11)$$

Полученное интегральное уравнение (9) с ядром, имеющим логарифмическую особенность, согласно первой теореме Фредгольма имеет решение при любой правой части $f(x)$, поскольку соответствующее однородное уравнение не имеет решений, отличных от тривиального нулевого. Действительно, равенство нулю правой части в (9) означает отсутствие внешних сил, действующих на контур разреза, что сразу же позволяет сделать вывод о справедливости тождества: $v(x) \equiv 0$.

Таким образом, согласно теории интегральных уравнений решение (9) можно представить в виде ряда:

$$v(x) = v_0(x) + I v_1(x) + I^2 v_2(x) + \dots, \quad (12)$$

который будет сходящимся при достаточно малом I .

Сделаем оценку величины этого параметра согласно (10). Для большинства металлов справедлива оценка: $0,001 \leq s_s / E \leq 0,01$, причём нижняя граница соответствует пластичным материалам, верхняя – более хрупким. В свою очередь, имеющиеся экспериментальные значения \bar{W}_* [2] находятся в пределах: $0,3 \leq \bar{W}_* \leq 1,6$. Комбинируя приведённые оценки, получим средневзвешенное значение I для основных конструкционных материалов: $I_{\text{нб}} \cong 0,003$.

Полученный порядок малости величины I позволяет говорить о сходимости ряда (12) и, следовательно, о возможности решения уравнения (9) в виде (12). Детальное исследование сходимости этого решения выходит за рамки настоящей работы. Однако следует отметить, что точным условиям сходимости является нормируемость ядра:

$$\int_{-c}^c |G(c, x, x)|^2 dx \leq A,$$

которая доказывается непосредственным интегрированием. Здесь A – ограниченная величина.

Подставив ряд (12) в уравнение (9) и приравняв выражения при одинаковых степенях I , получим рекуррентные соотношения

$$v_i(x) = \frac{2}{h} \left[\int_{-c_{i-1}}^{c_{i-1}} v_{i-1}(x) G(c, x, x) dx + \left(\int_{-c_{i-1}}^{-l} + \int_l^{c_{i-1}} \right) v_{i-1}(x) G(c, x, x) dx \right];$$

$$v_0(x) = f(x), \quad |x| \leq c_{i-1}; \quad i = 1, 2, \dots \quad (13)$$

Для определения величины «с» представим её в виде числового ряда:

$$c_i = \sum_0^i I^m \bar{c}_m, \quad (14)$$

в котором слагаемые \bar{c}_m определяются в результате решения последовательности уравнений, аналогичных (11):

$$\frac{d v_m(\bar{c}_m)}{dx} = 0. \quad (15)$$

Таким образом, процедура нахождения решения уравнения (9) представляет собой циклический процесс, который проводится по следующему алгоритму.

1. Определяется функция $v_0(x)$ по формулам (10) и (13), $i = 0$.

2. Решается уравнение (15) и определяется \bar{c}_0 .

3. По формуле (13) определяется $v_1(x)$, $i = 1$.

4. Решается уравнение (15) и определяется \bar{c}_1 .

5. По формуле (14) определяется c_1 .

Далее процесс повторяется для $i = 2$ с пункта 3. Процедура может быть закончена при любом выбранном значении $i = n$.

Тогда решение уравнения (9) запишется следующим образом:

$$v(x) = v_0(x) + I v_1(x) + \dots + I^n v_n(x). \quad (16)$$

Здесь $v_i(x)$ определяются из уравнения

(13), в котором, в свою очередь, величины c_{i-1} вычисляются по уравнениям (14) и (15).

Напряжения $s(x)$ определяются на контуре разреза и в пластических зонах непосредственно из граничных условий (7), а при $x \geq c$ – по формуле (8).

Априорный анализ полученных результатов даёт возможность сделать следующие выводы.

1. Моделирование деформаций у несквозного разреза-трещины по схемам жёсткопластического течения позволило учесть изменение геометрии свободных поверхностей в областях пластических деформаций, а также установить механический и физический смысл раскрытия берегов разреза-трещины как критерия разрушения.

2. Получено решение рассматриваемой упругопластической задачи в квадратурах и разработан алгоритм получения численных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 08-08-99042.

Библиографический список

1. Степанов, С. Л., Варганов, А. А. Исследование предельного состояния пластин с несквозными трещинами переменной глубины в плоском напряжённом состоянии. // Труды Третьей Всероссийской научной конференции: Математическое моделирование и краевые задачи. Ч.1. - Самара: СамГТУ, 2006. - С. 216-221.

2. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жесткопластических тел. / А И. Хромов. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 181 с.

3. Слепьян, Л. И. Механика трещин. / Л. И. Слепьян. - Ленинград: Судостроение, 1981. - 295 с.

4. Панасюк, В. В. Распределение напряжений около трещины в пластинах и оболочках. / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацышин. - Киев: Наукова думка, 1976. - 442 с.

References

1. Stepanov, S. L., Varganov, A. A. Analysis of the limiting state of plates with non-through variable-depth cracks in a plane stressed state // Transactions of the Third All-Russian scientific conference: Mathematical modeling and boundary problems. Part 1. – Samara. Samara State Technical University, 2006. – pp. 216-221.
2. Khromov, A. I. Deformation and rupture of rigid plastic bodies // Vladivostok: Dalnauka, 1966 – 181 pp.
3. Slepyan, L. I. Crack mechanics. Leningrad: Sudostroyeniye (Shipbuilding), 1981. – 295 pp.
4. Panasyuk, V. V., Savruk, M. P., Datsyshin, A. P. Strain distribution near cracks in plates and shells. Kiev: Naukova dumka, 1976. – 442 pp.

**ELASTIC-AND-PLASTIC PROBLEM FOR A THIN PLATE WITH
A NON-YHROUGH CRACK CUT FOR THE CASE OF LOCALIZED STRAIN
ACCORDING TO RIGID PLASTIC FLOW SCHEMES**

© 2008 S. L. Stepanov

Samara State Aerospace University

An elastic-and-plastic problem of the tension of a thin plate with a non-through (surface) cut is formulated. The process of plastic deformation of material both along the entire length of the cut and in plastic areas at its apices is modelled according to rigid plastic flow schemes, which makes it possible to take into consideration the changes in plate geometry along the thickness in the vicinity of the non-through cut and along its length. The solution of Fredholm's integral equation in quadratures is obtained and the procedure for defining numerical results is designed. The dependence of the cut side opening on plate thickness and depth is defined in an explicit form. Cut side opening is used as deformation rupture criterion.

Crack cut, plastic deformation, elastic-and-plastic problem, spatial density, dissipation energy, rupture criterion, integral equation

Информация об авторе

Степанов Сергей Львович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры летательных аппаратов. Область научных интересов: пластичность, деформация, разрушение, прочность

Stepanov, Sergey Lvovitch, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor. Associate professor of aircraft construction department. Area of research: plasticity, deformation, rupture, strength.

ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КОНСОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЁТОМ ДЕФОРМАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА

© 2008 М. В. Сухотерин

Санкт–Петербургский государственный университет водных коммуникаций

Предложен итерационный метод суперпозиции исправляющих функций для начального приближения в виде гиперболо-тригонометрических рядов по двум координатам, которые по мере наложения взаимно компенсируют порождаемые ими невязки в граничных условиях. Невязки убывают с ростом числа итераций, и решение можно получить с любой степенью точности. Приведены численные результаты расчетов прогибов и изгибающих моментов консольной пластины Рейсснера под действием равномерной нагрузки. Дается сравнение с классической теорией.

Прямоугольная консольная пластина Рейсснера, изгиб, итерационный метод, ряды Фурье, точное решение

Уточнённая теория пластин Э. Рейсснера [1], в отличие от классической (теории Кирхгоффа) [2], учитывает влияние деформации поперечного сдвига на изгиб. Это влияние может заметно сказываться на напряженном состоянии вблизи контура пластины и точек приложения сосредоточенных сил, а также на величине прогиба.

Проблема изгиба прямоугольной консольной пластинки Рейсснера является наименее изученной вследствие сложности краевой задачи. Какие-либо результаты её решения неизвестны.

Цель работы – построение итерационного процесса, реализация которого на ЭВМ позволяет получить решение задачи с любой точностью, а также сравнение численных результатов уточнённой теории и классической.

За основу принят метод суперпозиции, высказанный в [2] и реализованный на конкретных задачах в работах [3,4,5]. В данной задаче поочередно накладываются две функции прогибов и напряжений, которые в ходе итерационного процесса взаимно компенсируют порождаемые ими невязки в исходных граничных условиях. При этом все невязки уменьшаются, и решение приближается к точному решению задачи.

Рассмотрим прямоугольную консольную пластинку $-\gamma/2 \leq x \leq \gamma/2$, $0 \leq y \leq 1$ (край $y = 0$ защемлён, остальные - свободные) постоянной толщины h , нагруженную по повер-

хности $z = h/2$ равномерно распределённой поперечной нагрузкой интенсивности q .

Задача изгиба такой пластинки, согласно Э. Рейсснеру [2], описывается двумя фундаментальными уравнениями

$$\nabla^2 \nabla^2 w = -1, \quad y - a \nabla^2 y = 0 \quad (1)$$

и граничными условиями

$$w = 0, \quad j_x = 0, \quad j_y = 0 \quad \text{на грани } y = 0; \quad (2)$$

$$M_y = 0, \quad Q_y = 0, \quad H_{xy} = 0 \quad \text{на грани } y = 1; \quad (3)$$

$$M_x = 0, \quad Q_x = 0, \quad H_{xy} = 0 \quad \text{на гранях } x = \pm \gamma/2. \quad (4)$$

Здесь координаты точек пластины отнесены к размеру b пластины; прогиб $w(x,y)$ отнесён к величине qb^4/D ; функция напряжений $y(x,y)$ – к величине qb^2 ; D – цилиндрическая жесткость; $\gamma = a/b$; a – размер пластины по оси x ; $a = h^2/10$; ∇^2 – двумерный оператор Лапласа; углы поворота элементов j_x, j_y , моменты M_x, M_y, H_{xy} и перерезывающие силы Q_x, Q_y определяются формулами

$$j_x = (w + a_1 \nabla^2 w)'_x - a_1 y'_y,$$

$$j_y = (w + a_1 \nabla^2 w)'_y + a_1 y'_x,$$

$$M_x = -(w''_{xx} + n w''_{yy} + a_2 (\nabla^2 w)''_{xx}) + a_2 y''_{xy} + a_3,$$

$$M_y = -(w''_{yy} + n w''_{xx} + a_2 (\nabla^2 w)''_{yy}) - a_2 y''_{xy} + a_3, \quad + L_{sn} chx_s (y-1) \sin m_s x. \quad (12)$$

$$Q_x = -(\nabla^2 w)'_x + y'_y, \quad Q_y = -(\nabla^2 w)'_y - y'_x,$$

$$H_{xy} = (1-n)w''_{xy} + a_2 (\nabla^2 w)''_{xy} - a (y''_{yy} - y''_{xx}), \quad (5)$$

где n – коэффициент Пуассона, $\alpha_1 = \frac{2}{1-\nu} \alpha$,

$$a_2 = 2a, \quad a_3 = \frac{n}{1-n} a.$$

Прогиб пластины w и функцию напряжений u разыскиваем в следующем виде:

$$w(x, y) = w_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} [w_{1n}(x, y) + w_{2n}(x, y)]. \quad (6)$$

$$y(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} [y_{1n}(x, y) + y_{2n}(x, y)], \quad (7)$$

где

$$w_0(x, y) = -\frac{1}{24} [y^4 - 4y^3 + 6(1-2a_4)y^2 + 24a_1 y] \quad (8)$$

есть частное решение первого уравнения (1);

$$w_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (A_{kn} ch I_k x + B_{kn} x sh I_k x) \frac{\sin I_k y}{ch I_k^*}, \quad (9)$$

$$w_{2n} = -P_n y + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s}{ch m_s} [C_{sn} sh m_s (y-1) + D_{sn} ch m_s (y-1) + (y-1)(E_{sn} ch m_s (y-1) + F_{sn} sh m_s (y-1))] \cos m_s x, \quad (10)$$

$$y_{1n} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} G_{kn} \frac{sh b_k x}{sh b_k^*} \cos I_k y, \quad (11)$$

$$y_{2n} = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s}{sh x_s} [R_{sn} sh x_s (y-1) +$$

Здесь

$$A_{kn}, B_{kn}, P_n, C_{sn}, D_{sn}, E_{sn}, F_{sn}, G_{kn}, R_{sn}, L_{sn}$$

– неопределённые коэффициенты; $I_k = \frac{kp}{2}$,

$$m_s = \frac{2ps}{g}, \quad b_k = \sqrt{1/a + I_k^2}, \quad x_s = \sqrt{1/a + m_s^2},$$

$$a_4 = a_2 + a_3, \quad I_k^* = I_k g / 2, \quad b_k^* = b_k g / 2.$$

Функции w_{1n}, w_{2n} являются бигармоническими; функции y_{1n}, y_{2n} удовлетворяют второму уравнению (1). Функции w_{1n}, y_{1n} «автоматически» удовлетворяют первым двум граничным условиям (2) и последним двум условиям (3); функции w_{2n}, y_{2n} – последним двум условиям (4).

Начальный компонент w_0 (8) удовлетворяет всем граничным условиям, кроме первого условия (4). Невязка по изгибающему моменту от w_0 после разложения в ряд Фурье по синусам

$$M_{x_0} \Big|_{x=\frac{g}{2}} = n \left[\frac{(y-1)^2}{2} - a \right] = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k_0} \sin I_k y, \quad (13)$$

где

$$b_{k_0} = \frac{n}{I_k} \left(1 - \frac{2}{I_k^2} - a_2 \right), \quad (14)$$

используется для определения коэффициентов рядов (9), (11) при удовлетворении граничным условиям (4). Коэффициенты этих рядов примут вид:

$$B_{k1} = \frac{b_{k_0} / I_k}{3+n - (1-n) \frac{2I_k^*}{sh 2I_k^*} + 4a I_k (I_k - b_k \frac{th I_k^*}{th b_k^*}),$$

$$A_{k1} = \frac{1}{I_k} \left(\frac{1+n}{1-n} - I_k^* cth I_k^* \right) B_{k1}, \quad (15)$$

$$G_{k1} = -2I_k th I_k^* B_{k1}.$$

Невязки выполнения граничных условий на кромках $y = const$ от компонентов w_{11}

и y_{11} после разложения в ряд Фурье по косинусам (и перестановки знаков суммирования)

$$j_y |_{y=0} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} [A_{k1} I_k \frac{chl_k x}{chl_k^*} + \frac{B_{k1}}{chl_k^*} (I_k x sh I_k x + 2a_1 I_k^2 chl_k x) + G_{k1} a_1 b_k \frac{ch b_k x}{sh b_k^*}] =$$

$$= P_1 + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s a_{s1} \cos m_s x,$$

$$M_y |_{y=1} = - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} I_k \{ (1-n) A_{k1} I_k \frac{chl_k x}{chl_k^*} + \frac{B_{k1}}{chl_k^*} [(1-n) I_k x sh I_k x + 2(a_2 I_k^2 - n) chl_k x] + G_{k1} a_2 b_k \frac{ch b_k x}{sh b_k^*} \} = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s t_{s1} \cos m_s x,$$

где

$$P_1 = \frac{4n/g}{(1-n)} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{B_{k1} th I_k^*}{I_k}, \quad \tilde{k} = \frac{k+1}{2},$$

$$a_{s1} = \frac{8/g}{(1-n)} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{m_s^2 + n I_k^2}{I_k^2 + m_s^2} - \frac{2m_s^2}{b_k^2 + m_s^2} \right) \frac{I_k B_{k1} th I_k^*}{I_k^2 + m_s^2},$$

$$t_{s1} = \frac{8m_s^2}{g} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \left(\frac{2}{b_k^2 + m_s^2} - \frac{1-n}{I_k^2 + m_s^2} \right) \frac{I_k^2 B_{k1} th I_k^*}{I_k^2 + m_s^2},$$

используются для определения коэффициентов $C_{s1}, D_{s1}, E_{s1}, F_{s1}, R_{s1}, L_{s1}$ функций w_{21} (10) и y_{21} (12) при удовлетворении граничным условиям (2), (3).

Эти коэффициенты имеют вид:

$$C_{s1} = \frac{1+n}{m_s d_s} \{ [1 + (\frac{1}{2m_s} + \frac{2am_s^2}{1-n} e_s) sh 2m_s] t_{s1} + [h_s sh m_s + 4am_s^2 t_s ch m_s] a_{s1} \} ch m_s,$$

$$D_{s1} = \frac{1+n}{m_s d_s} \left(\{ \frac{sh^2 m_s}{m_s} + \frac{1-n}{1+n} m_s + \frac{4am_s^2}{1-n} [e_s sh^2 m_s +$$

$$+ \frac{1-n}{1+n} (\frac{sh m_s}{sh x_s} - \frac{m_s}{x_s}) \} t_{s1} + \{-2s_s + 4am_s^2 \times$$

$$\times [t_s (1 + \frac{1-n}{1+n} \frac{2m_s}{sh 2m_s}) + \frac{1-n}{1+n} q_s] \} sh m_s \cdot a_{s1} \} ch m_s,$$

$$E_{s1} = \frac{1-n}{1+n} m_s C_{s1}, \quad F_{s1} = s_s C_{s1} - D_{s1} ch m_s,$$

$$R_{s1} = \frac{1}{2ax_s} \{ \frac{ch m_s}{m_s} t_{s1} - (h_s - 4am_s^2 ch m_s) D_{s1} - 2(1 + 2am_s^2) s_s C_{s1} \} \frac{sh x_s}{ch m_s},$$

$$L_{s1} = -2 \frac{1-n}{1+n} m_s^2 \frac{sh x_s}{ch m_s} C_{s1},$$

где

$$d_s = (3+n)(1-n) sh^2 m_s + (1-n)^2 m_s^2 + 4 -$$

$$-16am_s^2 [\{ (\frac{3+n}{4} \frac{m_s}{x_s} + \frac{1-n}{4} \frac{x_s}{m_s}) \times$$

$$\times th x_s ch m_s - 1 + am_s^2 (g_s ch m_s - 2) \} sh^2 m_s +$$

$$+ (1 + 2am_s^2) t_s + \frac{1-n}{4} m_s (g_s - 2 \frac{sh m_s}{ch x_s})],$$

$$e_s = (\frac{1}{m_s} - \frac{1}{x_s} th x_s ch m_s), \quad h_s = (1-n) m_s - 2 ch m_s,$$

$$t_s = \frac{ch m_s}{ch x_s} - 1, \quad q_s = x_s th x_s - m_s th m_s,$$

$$s_s = 1 + \frac{1-n}{1+n} m_s ch m_s, \quad g_s = (\frac{m_s}{x_s} + \frac{x_s}{m_s}) th x_s.$$

После функций w_{21} и y_{21} , так же, как и после w_0 , остается невязка по изгибающему моменту на кромках $x = const$:

$$M_x |_{x=\frac{g}{2}} = \sum_{s=1}^{\infty} m_s \{ [(1-n) m_s C_{s1} + p_s E_{s1}] \frac{sh m_s (y-1)}{ch m_s} +$$

$$+ \frac{1}{chm_s} ((1-n)m_s D_{s1} + p_s F_{s1}) chm_s (y-1) + (1-n) \times \\ \times m_s (y-1) [E_{s1} chm_s (y-1) + F_{s1} shm_s (y-1)] + \\ + \frac{a_s x_s}{shx_s} [R_{s1} chx_s (y-1) + L_{s1} shx_s (y-1)] \},$$

где $p_s = 2(am_s^2 - n)$, которая после разложения в ряд Фурье по синусам

$$M_x |_{x=\frac{g}{2}} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_{k1} \sin I_k y,$$

где

$$b_{k1} = 4I_k \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{d_s (I_k^2 + m_s^2)} ((-1)^k I_k m_s^2 \left(\frac{2(1-n)}{I_k^2 + x_s^2} - \right. \\ \left. - \frac{(1-n)^2}{I_k^2 + m_s^2} \right) \left[\left(1 + \frac{sh2m_s}{2m_s} + \frac{2am_s^2}{1-n} e_s sh2m_s \right) t_{s1} + \right. \\ \left. + (h_s shm_s + 4am_s^2 t_s chm_s) a_{s1} \right] + \\ \left. + \left(\frac{2m_s^2}{I_k^2 + x_s^2} - \frac{m_s^2 + nl_k^2}{I_k^2 + m_s^2} \right) \{ -(h_s shm_s + \right. \\ \left. + 4am_s^2 t_s chm_s) t_{s1} + [(3+n)(1-n)m_s shm_s chm_s + \right. \\ \left. + (1-n)^2 m_s^2 - 4am_s^2 (1-n)q_s ch^2 m_s \} a_{s1} \},$$

вновь используются для отыскания коэффициентов A_{k2}, B_{k2}, G_{k2} рядов w_{12}, Y_{12} .

И далее описанный выше процесс повторяется.

Анализ показывает, что коэффициенты A_{kn}, B_{kn} ряда (9) имеют порядок $O(1/k^2)$ при $n=1$ и $O(\ln k/k^2)$ при $n>1$; коэффициенты G_{kn} ряда (11) – $O(1/k)$ и $O(\ln k/k)$ соответственно. Ряд (9)

сходится не хуже, чем ряд $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\ln k}{k^3}$. Ряд (11)

для функции напряжений сходится равномерно всюду, исключая концы заделанного сечения (где он расходится); то же самое относится к функциональному ряду $M_y |_{y=0}$, представляющему выражение изгибающего момента M_y в заделанном сечении пластины. Это означает, что на концах заделанного сечения имеют место «пики» напряжений, ко-

торые обусловлены резкой сменой граничных условий в этих точках.

Так как в ходе итерационного процесса невязки выполнения граничных условий должны убывать по абсолютной величине, то условие сходимости метода можно записать так: $\lim_{n \rightarrow \infty} (b_{kn}, a_{sn}, t_{sn}) = 0$. В силу линейной связи этих величин между собой и с коэффициентами $A_{kn}, B_{kn}, G_{kn}, \dots$ это условие равносильно, например, условию: $\lim_{n \rightarrow \infty} B_{kn} = 0$.

В свою очередь, коэффициенты B_{kn} линейно зависят от совокупности коэффициентов B_{kn-1} предыдущей итерации, т.е. имеет место однородная бесконечная система линейных алгебраических уравнений вида

$$B_{kn} = \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} c_{ki} B_{in-1} \quad (k=1, 3, \dots), \text{ где } c_{ki} - \text{коэффициенты системы.}$$

Исследования показывают, что эта система

является регулярной, т.е. $\sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} |c_{ki}| < 1$, а

это означает, что данный итерационный процесс сходится к точному решению задачи.

В качестве примеров получены численные результаты на ЭВМ для пластин с различным отношением сторон $\gamma = 1/4, 1/2, 1, 2,$

4 и различной толщины $\bar{h} = 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4$ при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,3$. В рядах удерживалось до 150 членов. Процесс сходился по геометрической прогрессии со знаменателем $< 1/2$. Счёт прекращался после 10 итераций. Вычислялись коэффициенты рядов (9-12), а также изгибающие моменты M_y в заделанном сечении и прогибы противоположной грани.

На рис. 1 приведены линии относительных прогибов w грани $y=1$, а на рис. 2 – эпюры изгибающих моментов M_y (отнесенных к величине qb^2) в заделке квадратной пластины ($\gamma=1$). Кривая I соответствует классической теории тонких пластин Кирхгоффа [4]. Номера кривых 2-6 соответствуют относи-

тельным толщинам $\bar{h} = 0,02; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ пластин Рейсснера.

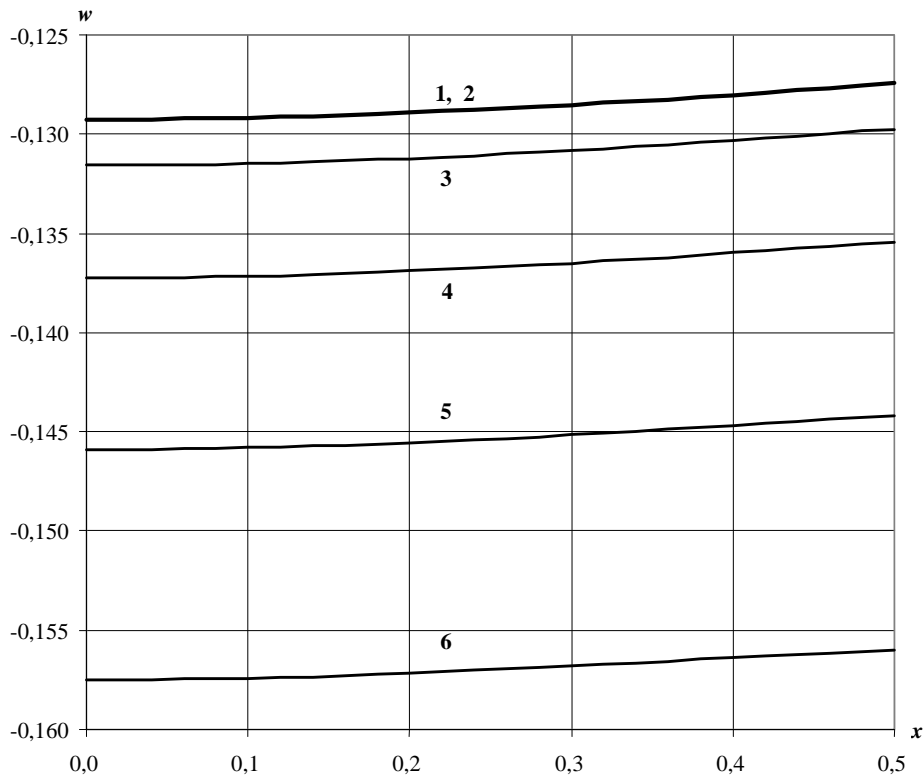


Рис. 1. Линии прогибов грани $y=1$

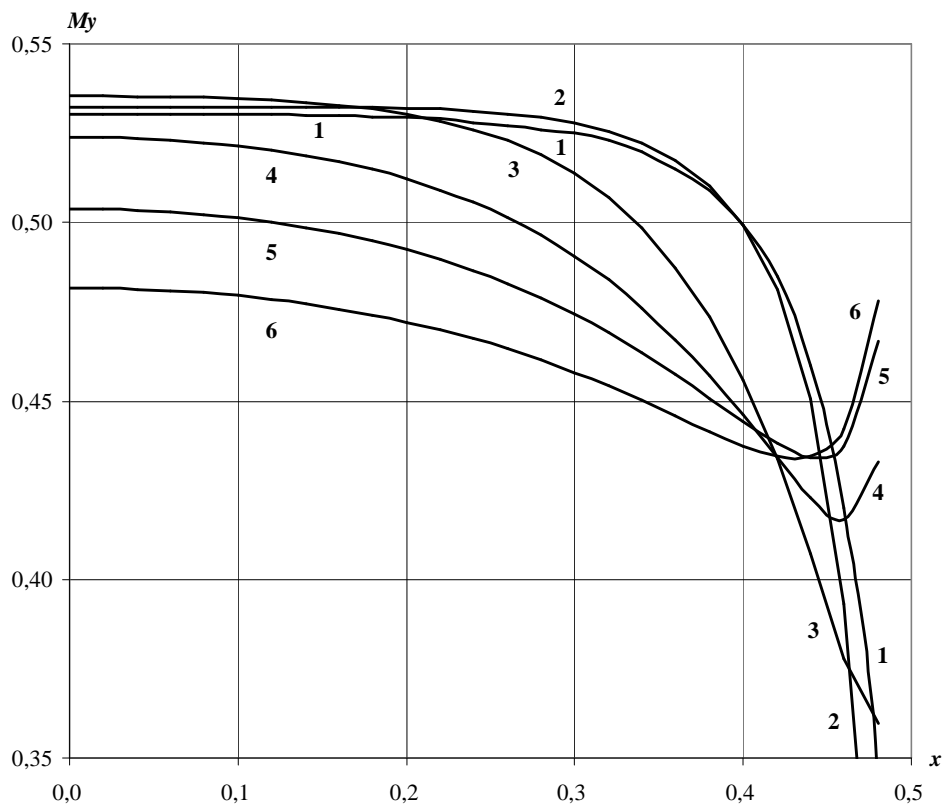


Рис. 2. Изгибающие моменты M_y в заделанном сечении

Расчёты показывают, что при малых относительных толщинах $\bar{h} \leq 1/20$ результаты для пластин Кирхгоффа и Рейсснера практически совпадают. Различия принципиального характера проявляются лишь в изгибающих моментах M_y заделанного сечения вблизи края заделки. Если для пластин Кирхгоффа $M_y \rightarrow -\infty$ при $x \rightarrow \pm\gamma/2$, то для пластин Рейсснера с ростом относительной толщины вблизи края заделки образуется минимум, который смещается к середине заделки и возрастает, после чего $M_y \rightarrow +\infty$. Таким образом, деформации поперечного сдвига, учитываемые в теории Рейсснера, резко меняют изгибающие моменты (а, следовательно, и напряжения) вблизи края заделанного сечения с $-\infty$ на $+\infty$. В середине заделки M_y с ростом \bar{h} сначала несколько возрастают, а затем убывают.

Относительные прогибы увеличиваются с ростом относительной толщины (абсолютные прогибы, разумеется, уменьшаются,

т.к. $w = \frac{WD}{qb^4}$, где w - относительный прогиб,

W - абсолютный прогиб срединной поверхности пластины).

Указанные выше особенности уточненной теории проявляются и для пластин с другим отношением сторон ($\gamma=1/4, 1/2, 1, 2, 4$).

Отметим для сравнения, что начальное приближение w_0 (8), соответствующее цилиндрическому изгибу пластины, даёт для прогибов грани $y = 1$ следующие значения: $-0,12507$; $-0,12664$; $-0,13157$; $-0,13981$; $-0,15129$ соответственно для относительных толщин $0,02$; $0,1$; $0,2$; $0,3$; $0,4$. Значения изгибающих моментов M_{y0} в заделке не зависят от толщины пластины и равны $0,5$ (как и для консольной балки).

Библиографический список

1. Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates. – J. Appl-Mech., 1945, 12, p. A69-A77.

2. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки. / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

3. Васильев, В. З. Применение метода наложения неполных решений в случае первой основной задачи для полубесконечного цилиндра. – Тр. Ленингр. инж.-строит. ин-та. - 1973, № 73. - Механика стержневых систем и сплошных сред. - С. 15–22.

4. Сухотерин, М. В. Итерационный метод решения задачи об изгибе прямоугольной консольной пластины // Прикл. механика. – Киев, 1982, т. 18, № 5. - С. 121–125.

5. Сухотерин, М. В. К исследованию изгиба защемленной по контуру прямоугольной пластины Рейсснера. // Прикл. механика. – Киев, 1990, т. 26, № 7. - С. 120–124.

References

Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates. – J. Appl-Mech., 1945, 12, p. A69-A77.

Timoshenko, S. P. Plates and shells. – Voinovsky-Kriger S. – Moscow: Nauka (Science), 1966. – 636 pp.

Vassilyev, V. Z. Application of incomplete solution superposition method in case of the first main task for a semi-infinite cylinder. – Transactions of Leningrad civil engineering

institute. - 1973, No. 73. – Mechanics of bar systems and continuous media, pp. 15–22.

Sukhoterin, M. V. Iteration method of solving a problem on rectangular cantilever plate bending / Applied mechanics. – Kiev, 1982, vol. 18, No. 5, pp. 121–125.

Sukhoterin, M. V. Analysis of contour restrained Reissner rectangular plate. / Applied mechanics. – Kiev, 1990, vol. 26, No. 7, pp. 120–124.

RECTANGULAR CANTILEVER PLATE BENDING WITH REGARD TO TRANSVERSE SHEAR DEFORMATION

© 2008 M. V. Sukhoterin

Saint Petersburg State University of Water Communications

The paper proposes an iteration method of correction function superposition for initial estimate in the form of hyperbolic-trigonometric series by two coordinates, which as they are superimposed, mutually compensate the misclosures they generate in boundary conditions. The misclosures decrease as the number of iterations grows and a solution can be obtained with any degree of accuracy. Numerical results of calculating deflections and bending moments of a Reissner cantilever plate under uniform loading are presented. Comparison with the classical theory is given.

Reissner rectangular cantilever plate, bending, iteration method, Fourier series, exact solution

Информация об авторе

Сухотерин Михаил Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций. Область научных интересов: теория пластин.

Sukhoterin, Mikhail Vassilyevitch. Associate professor of mathematics department, Saint Petersburg State University of Water Communications. Candidate of Physical and Mathematical Science. Area of research: plate theory.

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЗИЦИОННОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОПТРОННЫХ СТРУКТУРАХ**

© 2008 С. А. Матюнин, М. В. Степанов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассматриваются вопросы расчета погрешности нелинейности позиционной характеристики МОС-датчика перемещения

Датчик перемещения, многокомпонентные оптронные структуры, позиционная характеристика, погрешность нелинейности, синтез конструкции

Создание помехоустойчивых бесконтактных датчиков перемещения, работающих в жестких условиях эксплуатации, является актуальной проблемой во многих отраслях приборостроения. Большую долю таких преобразователей составляют оптические датчики, использующие различные способы преобразования и кодирования информации. Одним из указанных видов являются датчики перемещения, в которых используется эффект спектрального преобразования. Как показано в [1], применяя этот эффект, можно создавать устойчивые к внешним воздействиям датчики перемещений на многокомпонентных оптронных структурах (МОС-датчики) с высокими метрологическими характеристиками.

Одним из важных параметров датчика перемещений является погрешность нелинейности его позиционной характеристики (ПХ).

В данной работе производится расчет погрешности нелинейности позиционной характеристики МОС-датчика перемещений.

Известно [1, 2], что позиционную характеристику такого датчика можно описать выражением

$$I(j) = \frac{1}{2} \Phi_m T_m^1 T_m^2 S_m \sqrt{\frac{p}{C}} \text{Exp} \left(\frac{A(j)^2}{C} - B(j) \right) \quad (1)$$

где $C = K^\Phi + K^{T1} + K^{T2} + K^S$;

$$A(j) = K^\Phi I^\Phi + K^{T1} (I^{T1} - dl(j)) + K^{T2} I^{T2} + K^S I^S;$$

$$B(j) = K^\Phi I^{\Phi^2} + K^{T1} (I^{T1} + dl(j))^2 + K^{T2} I^{T2^2} + K^S I^{S^2};$$

$$dl(j) = I_{mT1} \text{Cos}(j_0) (\text{Sin}(j) \text{Tg}(j_0) + \text{Cos}(j) - 1)$$

– приращение максимума спектральной характеристики пропускания подвижного спектроформирующего элемента (СФЭ) в зависимости от его угла поворота; j_0 – начальный угол падения излучения на СФЭ; $K^\Phi, K^{T1}, K^{T2}, K^S$ – коэффициенты, определяющие ширину полос излучения, пропускания подвижного и неподвижного СФЭ и чувствительность приемника излучения соответственно; $I^\Phi, I^{T1}, I^{T2}, I^S$ – длины волн максимумов их спектральных характеристик.

Абсолютное отклонение позиционной характеристики (1) от линейной равно

$$\Delta(j) = J_{\text{лин}}(j) - J(j), \quad (2)$$

где $J_{\text{лин}}(j) = C_0 + C_1 j$ – линейная аппроксимация ПХ.

При этом коэффициенты C_0, C_1 можно определить по критерию минимальной квадратичной погрешности:

$$\int_{j_{\text{мин}}}^{j_{\text{макс}}} \left(C_0 + C_1 j - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{p}{C}} \text{Exp} \left(\frac{A(j)^2}{C} - B(j) \right) \right)^2 \rightarrow \text{min}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов C_0, C_1 воспользуемся методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=0}^N (C_0 + C_1 j_i - J_i(j_i))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь N – количество точек, полученных при дискретизации ПХ.

Дифференцируя выражение (4) по C_0 и C_1 и приравнявая значения частных производных к нулю, получим систему

$$\begin{cases} \tilde{N}_1 \sum_{i=0}^N j_i + N C_0 = \sum_{i=0}^N J_i(j_i), \\ N C_1 \sum_{i=0}^N j_i^2 + C_0 \sum_{i=0}^N j_i = N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i). \end{cases} \quad (5)$$

Учитывая, что рабочий диапазон перемещения датчика симметричен относительно нуля ($\pm j_{\max}$) и $\sum_{i=0}^N j_i = 0$, получим систему уравнений вида

$$\begin{cases} N C_0 = \sum_{i=0}^N J_i(j_i), \\ N C_1 \sum_{i=0}^N j_i^2 = N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда величины коэффициентов C_0, C_1 определяются:

$$\begin{cases} \tilde{N}_0 = \frac{\sum_{i=0}^N J_i(j_i)}{N}, \\ C_1 = \frac{N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i)}{N \sum_{i=0}^N j_i^2}. \end{cases} \quad (7)$$

При $N \rightarrow \infty$ получим

$$\begin{cases} C_0 = \frac{1}{2j_{\max}} \int_{-j_{\max}}^{j_{\max}} J(j) dj, \\ C_1 = \frac{\int_{-j_{\max}}^{j_{\max}} j J(j) dj}{\frac{8}{3} j_{\max}^3 - j_{\max}^2}. \end{cases} \quad (8)$$

График ПХ датчика и его линейная аппроксимация изображены на рис. 1.

Из анализа формулы (1) и рис. 1 можно сделать вывод, что позиционная характеристика МОС-датчика имеет форму кривой Га-

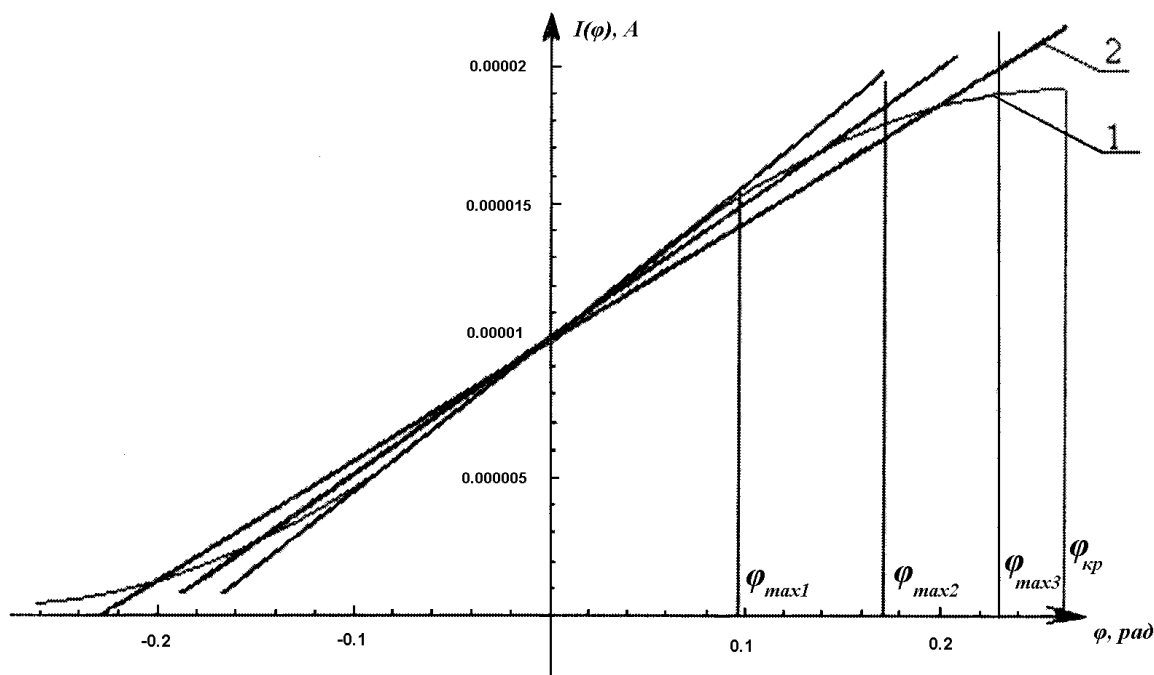


Рис. 1. Позиционная характеристика датчика (кривая 1), линейная аппроксимация позиционной характеристики (кривая 2)

усса. Следовательно, существует некоторое критическое значение диапазона перемещения $j_{кр}$, совпадающее с максимумом ПХ.

Кроме того, при увеличении диапазона перемещения j_{max} погрешность нелинейности ПХ датчика увеличивается, а чувствительность уменьшается. Чувствительность определяется тангенсом угла наклона ПХ к оси абсцисс $a = C_1$.

При фиксированном диапазоне перемещения чувствительность датчика будет максимальной, если j_{max} совпадает с критическим значением $j_{кр}$ (рис. 1).

Таким образом, задача синтеза конструкции МОС-датчика перемещения является многокритериальной.

Рассмотрим особенности методики синтеза МОС-датчика по критериям максимальной чувствительности и минимальной погрешности нелинейности.

При синтезе конструкции по критерию максимальной чувствительности коэффициенты линейной аппроксимации ПХ рассчитываются по формуле (8), а относительная приведённая погрешность нелинейности ПХ и чувствительность датчика определяются из условий

$$d(j) = \frac{|J(j) - (C_0 + C_1 j)|}{\max |J(j)|} = \frac{|J(j) - (C_0 + C_1 j)|}{\sup\{|J(j_{max})|, |J(j_{min})|\}} \leq d_{\text{дир}}; \quad (9)$$

$$\tilde{N}_1(A, B, C) \rightarrow \max.$$

График зависимости относительной приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения представлен на рис. 2.

При синтезе конструкции по критерию минимальной погрешности нелинейности ПХ значение границы рабочего диапазона a_{max} гораздо меньше критического значения $j_{кр}$.

Условие оптимизации параметров МОС-датчика при таком расчёте:

$$d(j) \rightarrow \min;$$

$$C_1(A, B, C) \geq C_{100\%}. \quad (10)$$

Из рис. 1 видно, что чувствительность датчика a и угол наклона линейной ПХ практически не зависят от j_{max} . Тогда с некоторой погрешностью величину чувствительности датчика можно определить из выражения

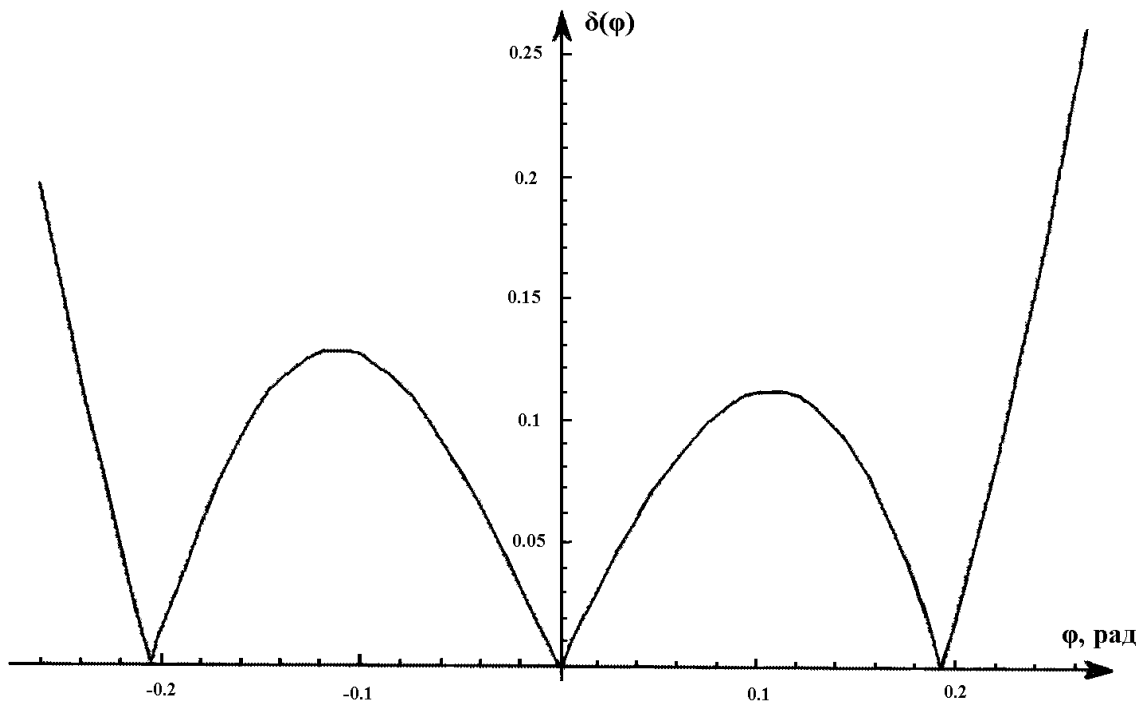


Рис. 2. График зависимости относительной приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения

$$a = \frac{dJ(j)}{dj} \Big|_{j=0} = \frac{1}{2} \Phi_m T_m^1 T_m^2 S_m \text{Exp} \left(\frac{A(j=0)^2}{C} - B(j=0) \right) \sqrt{\frac{P}{C}} \times$$

$$\times \left(K^{\pi} (I^{\pi})^2 T g(j_0) - \frac{2(K^{\phi} I^{\phi} + K^{\pi} I^{\pi} + K^{T2} I^{T2} + K^S I^S) K^{\pi} I^{\pi} T g(j_0)}{C} \right) =$$

$$= J(0) * F. \quad (11)$$

В этом случае из (2) получим

$$J_{\text{лин}}(j) = J(0) + J(0) * F * j. \quad (12)$$

С учётом (11) приведённая погрешность нелинейности ПХ определяется:

$$d(j) = \frac{|J(j) - J_{\text{эи}}(j)|}{\max |J(j)|} =$$

$$= \frac{|J(j) - (J(0) + J(0) * F * j)|}{\sup \{|J(j_{\text{max}})|, |J(j_{\text{min}})|\}}. \quad (13)$$

График зависимости приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения представлен на рис. 3.

Поскольку линейная аппроксимация ПХ в данном случае представляет собой ка-

сательную в точке $j = 0$, то максимальное значение погрешности нелинейности достигается на границе диапазона измерения и равна

$$d(j) = \frac{|J(j) - J_{\text{эи}}(j_{\text{max}})|}{|J(j_{\text{max}})|} =$$

$$= \frac{|J(j) - (J(0) + J(0) * F * j_{\text{max}})|}{|J(j_{\text{max}})|}. \quad (14)$$

Итак, при синтезе конструкции МОС-датчика перемещения необходимо оптимизировать ряд его параметров, в частности:

- длины волн максимумов спектральных характеристик пропускания СФЭ I^{T1}, I^{T2} ;
- полосы пропускания СФЭ $\Delta I^{T1}, \Delta I^{T2}$;
- начальный угол падения излучения на СФЭ j_0 .

Рассмотренные выше методики дают возможность перейти от частных критериев оптимизации к общему и создать обобщённую методику расчёта и оптимизации параметров МОС-датчика перемещения.

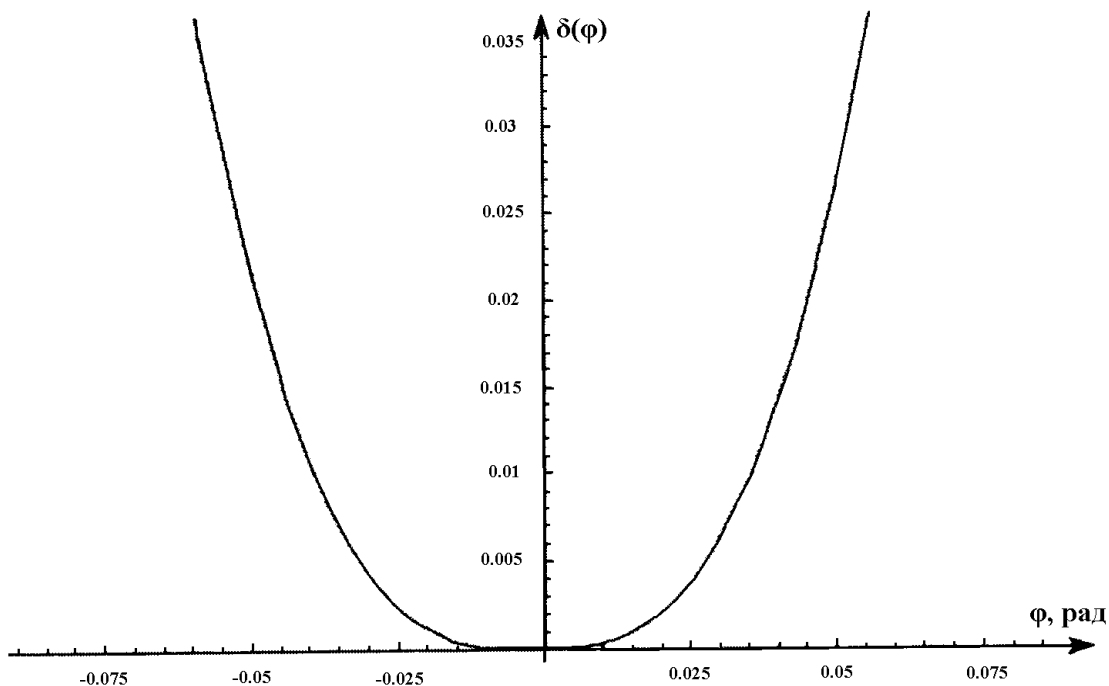


Рис. 3. График зависимости приведенной погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения

Библиографический список

1. Матюнин, С. А. Многокомпонентные оптронные структуры [Текст] / С. А. Матюнин. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2001. – 260 с. – ISBN 5-93424-040-4.
2. Матюнин, С. А. и др. Аппроксимация спектральных характеристик элементов многокомпонентных оптронных структур функциями Гаусса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета [Текст] / С. А. Матюнин, А. Б. Борисов, М. Ю. Иноземцев. – 2001. – Вып. 5 – С. 76–82. – Библиогр. : С. 82.

References

1. Matyunin, S. A. Multicomponent optronic structures. / S. A. Matyunin. – Samara: Samara scientific centre of the Russian Academy of Sciences, 2001. – 260 pp. – ISBN 5-93424-040-4.
2. Matyunin, S. A. et al. Approximation of spectral characteristics of multicomponent optronic structure elements by Gaussian functions // Vestnik of Samara State Aerospace University / S. A. Matyunin, A. B. Borisov, M. Yu. Inosemtsev. – 2001. – Issue 5. – pp. 76-82. – Bibliogr.: p. 82.

ANALYSIS OF THE ERROR OF NON-LINEARITY OF POSITIONAL CHARACTERISTICS OF A DISPLACEMENT TRANSDUCER ON MULTICOMPONENT OPTRONIC STRUCTURES

© 2008 S. A. Matyunin, M. V. Stepanov

Samara State Aerospace University

The paper deals with calculating the error of non-linearity of positional characteristics of a displacement transducer on multicomponent optronic structures.

Displacement transducer, multicomponent optronic structures, positional characteristics, error of non-linearity, construction synthesis

Информация об авторах

Матюнин Сергей Александрович, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационно-измерительные системы и устройства, автоматизация технологических процессов.

Степанов Максим Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электронных систем и устройств. Место работы: ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Matynin, Sergey Alexandrovitch, head of the department of electronic systems and devices, doctor of technical science, professor. Area of research: information measurement systems and devices, automation of technological processes.

Stepanov, Maxim Vladimirovitch, senior research officer, candidate of technical science, department of electronic systems and devices. Place of work: State Research-and-Production Space Rocket Centre “CSDB-Progress”. Area of research: element and devices of computational equipment and control systems.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА И МОНТАЖА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ СКРЫТОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

© 2008 В. А. Барвинок, Ю. С. Ключков, М. В. Любимов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается проблема оценивания качества процессов производства и монтажа технических систем с учётом наличия скрытого потребителя. Определены процедуры оценивания качества процессов жизненного цикла. Сформирован инструментарий анализа требований с позиций владельца процесса.

Менеджмент качества, техническая система, потребитель, оценка удовлетворённости

Бизнес-процессы с присутствием в них скрытого потребителя являются реальностью для предприятий и организаций, осуществляющих работы и услуги. Под скрытым потребителем понимается потребитель деятельности организации, который явно не инициировал начало бизнес-процесса, но является непосредственным его участником.

К подобным процессам относятся процессы производства и монтажа технических систем, инженерного оборудования. Особенности таких процессов является то, что этапы жизненного цикла – производство и монтаж – реализуются на территории потребителя. Это накладывает дополнительные сложности, так как, во-первых, потребитель следит за качеством производственного цикла и, во-вторых, предоставляет свое помещение.

Скрытый потребитель является таким же участником процесса, как и другие потребители. Ценностное суждение о качестве процесса имеет такую же разрушительную силу, что и для обычного потребителя в случае неудовлетворенности качеством процесса. Поэтому проблема целостной оценки качества бизнес-процесса (с учетом ценностного суждения скрытого потребителя) является актуальной.

Анализ работ, посвящённых оценке качества процессов с наличием скрытого потребителя, показал, что в настоящее время данная проблема не решена. В настоящей статье предлагается возможный вариант её решения.

В соответствии с обобщённым алгоритмом оценки качества [1] задача оценки объекта представляет собой задачу измерения данного объекта в некоторой шкале. В случае оценки качества процесса имеет место оценка качества объекта с учетом аксиологического аспекта (ценностного) результата измерения. Под действием аксиологического аспекта оценка система оценки качества процесса имеет вид:

$$S_r = \{ Sb, Ob, B_s, q_{sr} \}. \quad (1)$$

Система (1) включает в себя следующие составляющие: Sb – субъект оценки (непосредственно оценивающий); Ob – объект оценки (оцениваемое); B_s – база сравнения; q_s – логика сравнения.

В решаемой задаче (оценка процесса с учётом наличия скрытого потребителя, сложности и множественности работ в процессе) система (1) представляет собой следующую совокупную систему сравнения:

$$S_r^\Sigma = \{ Sb^\Sigma, Ob^\Sigma, B_s^\Sigma, q_{sr}^\Sigma \}, \quad (2)$$

где Sb^S – совокупность субъектов оценки (непосредственно оценивающих процесс); Ob^S – объекты оценки (оцениваемые объекты); B_s^Σ – совокупная база сравнения; q_{sr}^Σ – свод правил сравнения.

При оценивании процесса выделены следующие субъекты процедуры оценивания:

владелец процесса, конечный потребитель продукции процесса и скрытый потребитель продукции процесса.

Выделим следующие направления оценки качества процессов в зависимости от объектов оценки:

- качества выхода процесса;
- качества протекания процесса;
- качества протекания процесса и выхода процесса.

В рассматриваемом случае уместным будет использование при построении алгоритма оценки третье направление, которое включает оценку качества процессов через оценку качества протекания процесса и выхода процесса. Это связано с тем, что бизнес-процесс оценивается владельцем, скрытым и конечным потребителем.

Представим выбранное направление оценки процесса в терминах работ P_i [2]. Оценка качества процесса O_{act} складывается из совокупности оценок качества протекания работ процесса O_{dev} , а также совокупности оценок качества результатов работ процесса O_{rez} :

$$\begin{aligned} \hat{I}_{act} &= \langle \hat{I}_{dev}^i, \hat{I}_{rez}^j \rangle; \\ \langle Sb^S, Ob^S, B_S^S, q_{sr}^S \rangle &: R_{P_{dev}} \rightarrow O_{dev}; \\ \langle Sb^S, Ob^S, B_S^S, q_{sr}^S \rangle &: R_{P_{rez}} \rightarrow O_{rez}; \\ \bar{R}_p &= \langle \{R_{P_{dev}}\}, \{R_{P_{rez}}\} \rangle; \\ R_{P_{dev}} &= \{T, R_w, Q_w\}; \quad R_{P_{rez}} = \{R_{re}, Q_{re}\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где O_{dev} – оценка качества протекания работ; O_{rez} – оценка качества результатов работ; $R_{P_{dev}}$ – качество протекания работы; $R_{P_{rez}}$ – качество результата работы; \bar{R}_p – качество работы, включающее в себя составляющие качество протекания работы и качество результата работы.

Проанализируем составляющие выражения (3) (рис. 1) для установления соответствия между субъектом и выполняемой им оценки. В результате могут быть выделены следующие пары:

- владелец процесса, осуществляющий оценку качества протекания процесса O_{dev}^{own} ;
- конечный потребитель, осуществляющий оценку качества выхода процесса O_{rez}^{cus} ;
- скрытый потребитель, осуществляющий оценки качества протекания процесса $O_{dev}^{sec.cus}$, выхода бизнес-процесса $O_{rez}^{sec.cus}$.

Следовательно, оценочный инструментальный владельца процесса (производителя) должен позволять получить представление обо всех оценках субъектов процедуры оценивания качества данного процесса.

Охарактеризуем полученные виды оценок на предмет их количества, вида размерности и других особенностей.

Оценка владельцем процесса качества протекания процесса O_{dev}^{own} , которая является

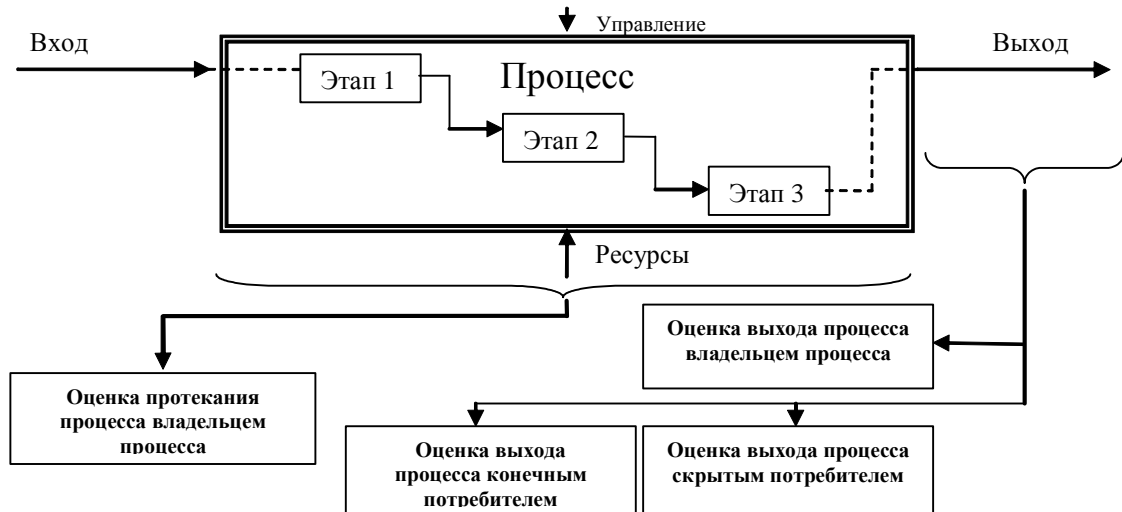


Рис. 1. Субъекты процедуры оценивания процесса

мерой стоимости производства выхода процесса для владельца. Она выполняется по составляющим работы $P_i = \{T^i, R_w^i, Q_w^i\}$. Затем формируется итоговая (комплексная) оценка протекания процесса. Систему оценки качества протекания каждой работы $S_{own_i}^{P_i} = \{Sb, Ob^{P_i}, B_s^{P_i}, q_{sr}^{P_i}\}$ формируют перечень показателей качества работ P_i по категориям $\{T^i, R_w^i, Q_w^i\}$ процесса как такового, уровни данных показателей качества на момент планирования (проектирования) процесса составляющих работ P_i .

Оценка конечным потребителем качества выхода процесса \hat{I}_{rez}^{cus} , которая является мерой удовлетворённости конечного потребителя конечным продуктом процесса. Выполняется по конечному выходу процесса по составляющим конечной работы $P_i^{end} = \{R_{re}^{end}, Q_{re}^{end}\}$.

Оценка скрытым потребителем качества протекания процесса $\hat{I}_{dev}^{sec.cus}$, которая является мерой удовлетворённости скрытого потребителя качеством протекания процесса. Выполняется по составляющим работы $P_i = \{T^i, R_w^i, Q_w^i\}$.

Оценка скрытым потребителем качества выхода процесса $\hat{I}_{rez}^{sec.cus}$, которая является мерой удовлетворённости скрытого потребителя конечным продуктом процесса.

Выполняется по конечному выходу процесса по составляющим конечной работы $P_i^{end} = \{R_{re}^{end}, Q_{re}^{end}\}$.

Порядок формирования оценок субъектами можно представить следующей диаграммой (рис. 2).

Таким образом, под качеством процесса будем понимать совокупность свойств процесса, обуславливающих его способность к созданию результата заданного уровня качества и количества с точки зрения владельца и потребителя (скрытого и конечного) процесса в заданные сроки.

Сформируем обобщённый алгоритм получения комплексной оценки качества процесса его владельцем (производителем) (рис. 3).

Порядок получения оценки качества процесса, приведённый в обобщенном алгоритме, разбивается на два частных случая.

1) Скрытый потребитель и конечный потребитель являются одним и тем же лицом. В этом случае оценки удовлетворённости скрытого и конечного потребителя конечного выхода процесса совпадают. Тогда определение удовлетворённости скрытого потребителя выходом процесса не требуется (в алгоритме данный этап выделен штриховой линией на рис. 3).

2) Скрытый потребитель и конечный потребитель являются разными лицами. В этом случае требуется проводить оценки в точном соответствии с обобщённым алгоритмом (рис. 3).

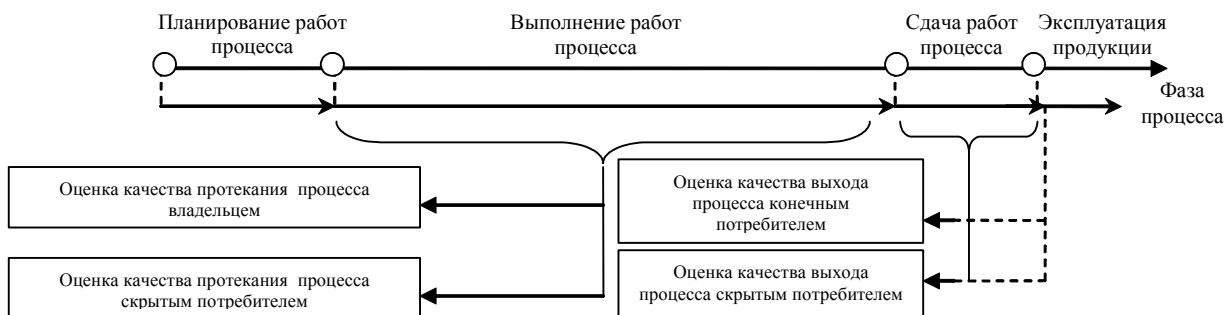


Рис. 2. Временная диаграмма формирования оценок качества объектов процесса его субъектами

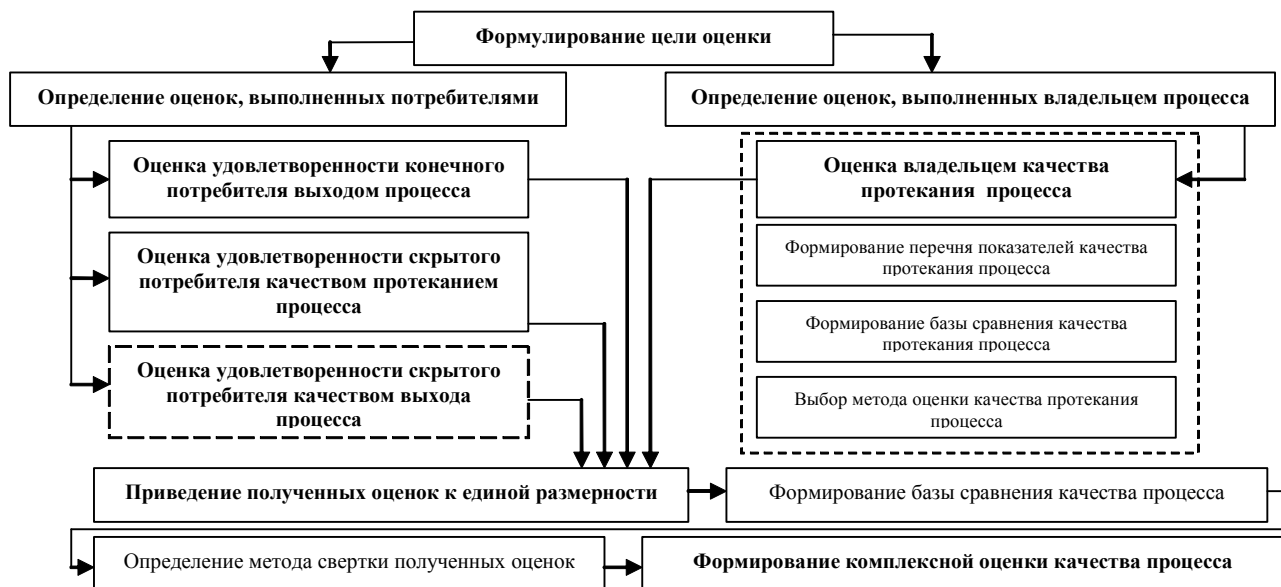


Рис. 3. Обобщённый алгоритм оценки качества процесса с учетом наличия скрытого потребителя

Разработка инструментария оценивания качества процесса. Сформированный алгоритм оценки качества процесса с учётом наличия скрытого потребителя (рис. 3) рассматривает три субъекта, определяющих итоговую конкурентоспособность процесса. Рассмотрим порядок формирования данных оценок владельцем процесса в соответствии с последовательностью, приведённой в обобщённом алгоритме.

Определение оценок владельцем процесса. Оценка владельцем качества протекания процесса связана с оценкой качества протекания составляющих его работ P_i : времени исполнения T , качества R_w и количества Q_w ресурсов, задействованных при выполнении работы.

Анализ работ по оценке качества протекания процессов [1-5] показал, что данная задача с тем или иным успехом решена для большинства отраслей народного хозяйства.

Основу большинства методик оценивания качества протекания процессов составляет комплексная оценка на базе операции аддитивного свертывания, а также анализ полученных относительных оценок по отдельным показателям качества протекания процесса. Использование данных моделей оценки показало их эффективность в решении оценки качества протекания процессов [1, 2, 5].

Определение оценок потребителями процесса. Конечный потребитель использует выход (продукцию) процесса и непосредственно оценивает соответствие выхода процесса собственным представлениям о данной продукции. Оценка же качества процесса на основе потребительской оценки качества выхода процесса является отражением способности процесса не только удовлетворять потребности производителя, но и потребности конечного потребителя в способности процесса обеспечивать выпуск продукции данного уровня качества.

Определение оценки качества выхода процесса конечным потребителем может быть выполнено на основании следующих подходов:

- моделирования потребительской оценки качества выхода процесса по шкале потребительской удовлетворённости;
- оценки удовлетворённости потребителя качеством выхода процесса;
- комбинированного подхода, включающего моделирование оценки качества выхода процесса по шкале потребительской удовлетворённости и непосредственное оценивание удовлетворённости потребителя качеством выхода процесса.

Наличие скрытого потребителя при протекании процесса говорит о малой продолжительности жизненного цикла процес-

са относительно невысокой его стоимости и высокой степени безопасности. Как следствие, продукция данных процессов не относится к высокотехнологичной продукции. Это определяет невысокую конкуренцию среди владельцев подобных процессов по качеству продукции, но предполагает высокую конкуренцию по качеству протекания процесса как такового, что определяет следующее:

- оценка качества выхода процесса, выполненная потребителем, может быть смоделирована оценкой технического уровня качества выхода процесса;

- оценка качества выхода процесса может осуществляться только на этапе передачи продукции потребителю.

Моделирование потребительской оценки качества выхода процесса в шкале потребительской удовлетворённости.

Оценка качества технического уровня выхода процесса может быть выполнена в соответствии с методикой, приведённой в [6]. Оценка технического уровня качества выхода по данной методике представляет собой либо комплексную оценку на базе операции аддитивного свёртывания, либо относительные оценки по отдельным показателям качества технического уровня выхода бизнес-процесса.

Полученную оценку качества выхода процесса необходимо перевести в соответствии со шкалой (табл.1) в предполагаемую удовлетворённость потребителя. Таблица сформирована на основе работ [1, 3, 7].

В случае, когда оценка качества выхода процесса не может быть ограничена оценкой качества технического уровня, её рекомендуется выполнять по методике [7].

Использование данной методики определяется следующими критериями:

- малые сроки морального старения продукции процесса (до 1-2 года);

- к выходу бизнес-процесса предъявляются высокие требования по эстетике и эргономике;

- потребитель интенсивно эксплуатирует продукцию (выход) процесса.

Оценка удовлетворённости потребителя качеством выхода процесса. На основании работ [8, 9], посвящённых оценке удовлетворённости потребителя, определена следующая шкала оценки итоговой удовлетворённости потребителя качеством выхода процесса (рис. 4).

Определение объёма выборки, составления плана опроса, оформления анкеты, анализа данных рекомендуется выполнять в порядке, приведённом в [9].

Комбинированный подход к определению потребительской оценки качества выхода процесса. В случае применения комбинированного подхода используются методы, указанные выше. Изначально моделируется потребительская оценка качества выхода процесса в шкале потребительской удовлетворённости, на основании которой настраивается процесс с целью достижения максимальной удовлетворённости.

По результатам работы процесса осуществляется оценка удовлетворённости потребителя качеством выхода процесса, на основании которой осуществляется корректировка процесса в направлении максимизации его эффективности.

Оценка качества протекания процесса, выполненная скрытым потребителем.

Выбор методики получения оценки качества протекания процесса, выполненной скрытым потребителем, зависит от ситуации, в которой находится скрытый потребитель, меха-

Таблица 1. Переводная шкала оценок качества продукции в меру удовлетворённости потребителя

Величина комплексной оценки качества $O_{рез\Sigma}^{own}$	0,3-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	>>1,2
Предполагаемая удовлетворённость потребителя (качественная оценка)	Отрицательная реакция. Потребитель не удовлетворён	Нейтральная реакция. Удовлетворённость потребителя незначительна	Незначительная положительная реакция. Удовлетворённость потребителя средняя	Максимальная положительная реакция. Удовлетворённость потребителя высокая

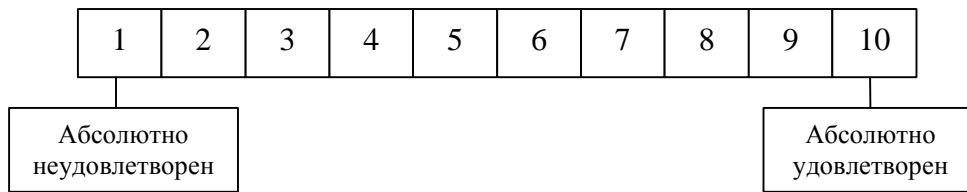


Рис. 4. Шкала итоговой оценки удовлетворённости потребителя

низма формирования им оценки протекания процесса, возможности владельца бизнес-процесса получить эту оценку.

В момент протекания процесса скрытый потребитель может находиться в следующих ситуациях:

- являться исполнителем (владельцем) другого бизнес-процесса;
- являться сторонним наблюдателем протекания процесса, результат которого прямо или косвенно будет им потребляться.

На основании этого можно сделать вывод, что процесс для скрытого потребителя является источником потерь, то есть источником уменьшения (в некоторых случаях потери) работоспособности, снижения ценностного представления о процессе и, как следствие этого, низкой удовлетворенности потребителя.

Современная оценка уровня потерь представлена в работе [10]. В основу работы положен принцип потерь, предложенный Г. Тагути. Работа посвящена вопросам потерь качества при производстве различных изделий [10]. Решение задачи определения оценки качества протекания процесса, выполненной скрытым потребителем, при помощи предложенных методов не представляется возможным.

Как было сказано выше, процесс является источником потерь той или иной интенсивности для скрытого потребителя. На основании закона Вебера-Фехнера, который описывает зависимость между воздействием отдельного фактора на человека и величиной этого ощущения, можно сделать вывод, что при увеличении интенсивности воздействия на потребителя величина его ощущения растет не прямо пропорционально. Данное утверждение характерно как для положительной реакции потребителя, так и для отрицательной.

На рис. 5 даны следующие обозначения: Dm – отклонение показателя качества от нормали; $U = f(Dm)$ – функция потерь удовлетворенности скрытого потребителя.

Свяжем принцип Г. Тагути и закон Вебера-Фехнера в следующем тезисе. Воздействие процесса на потребителя есть фактор, вызывающий негативную реакцию, функция которой есть функция потерь удовлетворённости скрытого потребителя (рис. 5).

Дадим характеристику функции $U = f(Dm)$. Величина потерь удовлетворённости потребителя зависит от Dm , которая выражает отношение между интенсивностью показателя качества в «повседневном, привычном, статически устойчивом» проявлении и интенсивностью этого же показателя качества в процессе:

$$Dm = \frac{m_{dev}}{m_{stat}} - 1, \tag{4}$$

где Dm - разность интенсивности показателя качества m ; m_{dev} - интенсивность показателя качества в процессе; m_{stat} - интенсив-

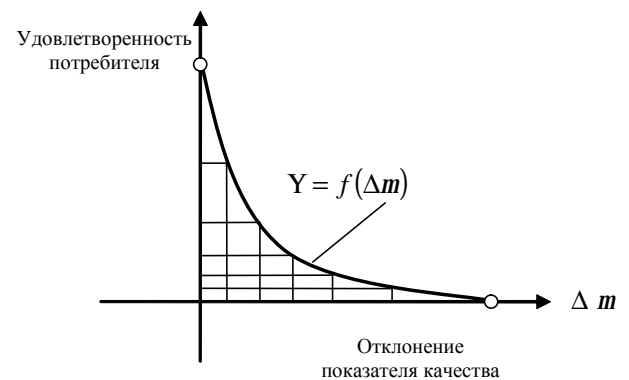


Рис. 5. Функция потерь удовлетворенности скрытого потребителя

ность показателя качества в условиях отсутствия протекания процесса (нормаль).

Таким образом, имеем функциональную зависимость превышения интенсивности показателя качества над потребительской нормой, выраженной в потере удовлетворённости.

Так как величины Dm , разности интенсивности показателя качества m невелики, то в качестве описательной функции выберем степенную функцию [10].

Величину максимальной удовлетворённости U_0 примем равной 1,0. Данный уровень соответствует максимальной удовлетворённости и согласован по качественному и количественному выражению с большинством существующих представлений о выражении максимального уровня удовлетворённости.

Тогда функция потерь имеет вид:

$$U = \frac{1}{m_0^2} (m_0 - Dm)^2, \quad (5)$$

где m_0 – уровень превышения интенсивности показателей качества бизнес-процесса, при котором удовлетворённость потребителя равна нулю.

Формирование перечня показателей качества, влияющих на потери удовлетворённости, определяют следующие критерии:

- показатели качества, воздействующие на работоспособность скрытого потребите-

ля (самочувствие, психофизическое состояние) – уровень шума; уровень запылённости; время простоя оборудования, работы при протекании процесса и др.;

- показатели качества, определяющие «нормальное», стандартное, принятое потребителем состояние рабочего места, расположения каналов коммуникаций и др.

Определение уровня m_0 может осуществляться следующими путями:

- на основе проведения экспериментальных исследований или потребительского опроса [9];

- эмпирически, с последующим уточнением уровня m_0 .

Использование формулы (5) зачастую связано с проведением дополнительных работ или с потерями при уточнении уровня m_0 . С целью снижения возможных потерь на основании проведённых исследований сформированы следующие соотношения групп показателей процесса, уровней Dm и m_0 , а также потерь удовлетворённости скрытого потребителя (табл. 2).

Для получения итоговой оценки качества протекания процесса, выполненной скрытым потребителем, владелец бизнес-процесса определяет на основании таблицы 2 степень влияния показателей качества выполнения работ D_i на удовлетворённость скрытого потребителя. На основании полу-

Таблица 2. Зависимость уровня потерь удовлетворённости потребителя от параметров показателей качества бизнес-процесса

Влияние процесса на деятельность скрытого потребителя	Превышение потребительской нормы Δm			Уровень характеристики процесса m_0 , приводящий к полной потере удовлетворённости скрытого потребителя
	$Y=0,8$	$Y=0,5$	$Y=0,3$	
Повышение уровня шума на рабочем месте скрытого потребителя	$\Delta m=0,2$ (на 20%)	$\Delta m=0,58$ (на 58%)	$\Delta m=0,90$ (на 90%)	2 (в 2 раза)
Повышение уровня запылённости на рабочем месте скрытого потребителя	$\Delta m=0,31$ (на 31%)	$\Delta m=0,85$ (на 85%)	$\Delta m=1,35$ (на 135%)	3 (в 3 раза)
Снижение работоспособности вследствие невозможности исполнения функциональных обязанностей	$\Delta m=0,1$ (на 10%)	$\Delta m=0,3$ (на 30%)	$\Delta m=0,45$ (на 45%)	1 (в 1 раз)
Изменение состояния рабочего пространства (потребительской среды), перенос рабочих инструментов (потребительского имущества)	-	-	-	0
Увеличение времени коммуникационного взаимодействия	$\Delta m=0,2$ (на 20%)	$\Delta m=0,58$ (на 58%)	$\Delta m=0,90$ (на 90%)	2 (в 2 раза)

ченных оценок удовлетворённости по определённым видам влияния на деятельность скрытого потребителя владелец процесса выбирает наименьшую степень удовлетворённости, которая и будет определять оценку качества протекания процесса, выполненную скрытым потребителем [1]:

$$O_{dev_S}^{sec.cus} = \min \{Y_1, Y_2, \mathbf{K}, Y_n\}, \quad (6)$$

где Y_i – степень удовлетворённости, соответствующая влиянию группы показателей качества процесса на деятельность скрытого потребителя; n – количество групп влияния на деятельность скрытого потребителя.

Оценка качества выхода процесса скрытым потребителем. Определение производителем (владельцем процесса) оценки качества выхода процесса скрытым потребителем базируется на тех же подходах, что и определение оценки качества выхода процесса, выполненной конечным потребителем.

Таким образом, на основании обобщённого алгоритма оценки качества процесса с учётом наличия скрытого потребителя владелец процесса формирует следующие оценки (табл. 3).

Формирование итоговой оценки качества процесса будем осуществлять на основе трёх оценок, выполненных потребителями процесса. Оценка, выполненная владельцем процесса, является «внутренней» оценкой, указывающей на уровень организации процесса. В то же время оценка уровня организации процесса отражена и в оценках потребителей, которые будем считать «внешними» по отношению к производителю.

Комплексную «внешнюю» оценку процесса будем формировать в общем случае из трёх оценок: оценки качества выхода процесса, выполненной конечным потребителем; оценки качества протекания процесса, выполненной скрытым потребителем, и оценки качества выхода процесса, выполненной скрытым потребителем. Эта оценка будет представлять собой вектор, образованный тремя составляющими оценками, приведёнными выше. Таким образом, комплексная оценка качества бизнес-процесса имеет вид:

$$\vec{I}_{dev}^{Scus} = \left\{ \begin{matrix} O_{rez_S}^{cus} \\ O_{dev_S}^{sec.cus} \\ O_{rez_S}^{sec.cus} \end{matrix} \right\}. \quad (7)$$

В итоге качество процесса определяется длиной вектора \vec{I}_{dev}^{Scus} или величинами его проекций на оси качества выхода процесса с точки зрения конечного потребителя, качества протекания процесса с точки зрения скрытого потребителя, качества выхода процесса с точки зрения скрытого потребителя:

$$\left\{ \begin{matrix} \vec{I}_{dev}^{Scus} & \rightarrow & \max; \\ O_{rez_S}^{cus} & \rightarrow & 1; \\ O_{dev_S}^{sec.cus} & \rightarrow & 1; \\ O_{rez_S}^{sec.cus} & \rightarrow & 1. \end{matrix} \right. \quad (8)$$

Полученный инструментарий оценивания качества процесса позволяет владельцу осуществлять его планирование с учетом уровня удовлетворённости потребителей.

Таблица 3. Оценивание качества процесса

Субъекты процесса оценивания	Виды оценок			
Владелец процесса; скрытый потребитель (конечный потребитель)	$O_{dev_2}^{own}$, оценка качества протекания процесса его владельцем	$O_{rez_\Sigma}^{cus}$, оценка качества выхода процесса, выполненная конечным потребителем	$O_{dev_2}^{sec.cus}$, оценка качества протекания процесса, выполненная скрытым потребителем	-
Владелец процесса; скрытый потребитель, конечный потребитель	$O_{dev_2}^{own}$, оценка качества протекания процесса его владельцем	$O_{rez_\Sigma}^{cus}$, оценка качества выхода процесса, выполненная конечным потребителем	$O_{dev_2}^{sec.cus}$, оценка качества протекания процесса, выполненная скрытым потребителем	$O_{rez_\Sigma}^{sec.cus}$, оценка качества выхода процесса, выполненная скрытым потребителем

Библиографический список

1. Субетто, А. И. Квалиметрия./ А. И. Субетто. – СПб.: Изд-во «Астерион», 2002. – 288 с.
2. Субетто, А. И. Методы оценки качества проектов и работ. Испытания технических систем. / А. И. Субетто. – СПб.: Астерия, 2003. – 204 с.
3. Зорин, Ю. В. Системы качества и управления процессами./ Ю. В. Зорин, В. Т. Ярыгин. – Самара: СПИ, 1997. – 156 с.
4. Азгальдов, Г. Г. Количественная оценка качества (квалиметрия). Библиография./ Г. Г. Азгальдов, А. А. Азгальдова. – М.: Издательство стандартов, 1971. – 175 с.
5. ГОСТ Р 50779.44-2001 ПОКАЗАТЕЛИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ. Основные методы расчета. - М.: Издательство стандартов, 2001. – 25 с.
6. Федюкин, В. К. Методы оценки и управления качеством промышленных изде-

лий: Учебник. - Изд. 2-е перераб. и доп./ В. К. Федюкин, В. Д. Дурнев, В. Г. Лебедев. – М.: Информационно-издательский дом «Филин», Рилант, 2001. – 328 с.

7. Статистические методы повышения качества / Под ред. Хитоси Кумэ. – М.: Финансы и Статистика, 1990. – 325 с.

8. Светуных, С. Г. Методы маркетинговых исследований: Учебное пособие. / С. Г. Светуных. – СПб.: Издательство ДНК, 2003 – 352 с.

9. Хилл, Н. Измерение удовлетворенности потребителя по стандарту ИСО 9000:2000. / Н. Хилл, Б. Сельф, Г. Роше. - М.: Издательский дом «Технологии», 2004. – 192 с.

10. Ефимов, В. В. О функции потерь качества деталей в сборке / В. В. Ефимов. // Методы менеджмента качества. - 2003. - №11. - С. 42 – 47.

References

1. Subetto, A. I. Qualimetry. – Saint Petersburg: Publishing house “Asterion”, 2002. – 288 pp.
2. Subetto, A. I. Methods of assessing the quality of designs and performances. Testing of technical systems. Saint Petersburg: Asteria, 2003 – 204 pp.
3. Zorin, Yu. V., Yarygin, V. T. Systems of quality and process management. – Samara: Samara, 1997. – 156 pp.
4. Azgaldov, G. G., Azgaldova, A. A. Quantitative quality assessment (qualimetry). Bibliography. – Moscow: Standards publishing house, 1971. – 175 pp.
5. GOST (State Standard) P. 50779.44-2001. Indicators of Process Possibilities. Basic methods of calculation. – Moscow: Standards publishing house, 2001 – 25 pp.

6. Fedyukin, V. K., Durnev, V. D., Lebedev, V. G. Methods of assessing and managing the quality of manufactured goods: Manual. 2nd revised edition. – Moscow: Information-and-publishing house “Filin”, Rilant, 2001 – 328 pp.

7. Statistical methods of improving quality / Edited by Khitosi Kume. – Moscow: Finances and Statistics, 1990 – 325 pp.

8. Svetun'kov, S. G. Methods of marketing analysis: Teaching aid – Saint Petersburg: 2003 – 352 pp.

9. Hill, N., Self, B., Rochet, G. Measuring consumer's satisfaction according to ISO standard 9000:2000. – Moscow: Publishing house “Tekhnologii” (Technologies), 2004. – 192 pp.

10. Yefimov, V. V. The function of part quality losses in assembly // Methods of quality management. 2003 – No. 11 – pp. 42-47.

METHOD OF ASSESSING THE QUALITY OF PRODUCTION PROCESSES AND MOUNTING OF TECHNICAL SYSTEMS CONSIDERING LATENT CONSUMER

© 2008 V. A. Barvinok, Yu. S. Klotchkov, M. V. Lyubimov

Samara State Aerospace University

The paper deals with the problem of assessing the quality of production processes and mounting of technical systems considering the presence of latent consumer. Procedures of assessing the quality of life cycle processes are specified. Tools for analyzing requirements from the standpoint of the process owner are formed.

Quality management, technical system, consumer, satisfaction assessment

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН. Директор научно-исследовательского института технологий и проблем качества, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Область научных интересов: теория и методы оценки качества продукции, управление качеством в машиностроении. Область научных интересов: теория и методы оценки качества продукции, управление качеством в машиностроении.

Клочков Юрий Сергеевич, доцент, кандидат технических наук, СГАУ. Область научных интересов: теория и методы оценки качества продукции, управление качеством в машиностроении.

Любимов Максим Викторович, ассистент, аудитор, СГАУ, представитель TUV Cert. Область научных интересов: теория и методы оценки качества продукции, управление качеством в машиностроении.

Barvinok, Vitaly Alexyevitch, Doctor of Technical Science, professor, Correspondence Member of the Russian Academy of Sciences. Director of Research Institute of technologies and quality problems, Head of the Department of aircraft construction and quality management in mechanical engineering. Area of research: physics and mathematical modeling of thermal and deformation processes in solids, developing physical and mathematical models of processes of interaction between accelerated plasma flows and a solid body.

Klotchkov, Yuri Sergeevitch, associate professor, candidate of Technical Science, SSAU. Area of research: process management, synergetics, qualimetry, statistical methods of assessing quality.

Lyubimov, Maxim Victorovitch, assistant, auditor, SSAU, representative TUV Cert. Area of research: quality system audit, systems of personnel motivation, expert systems.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА РЕШЕНИЙ НА ИТЕРАЦИЯХ ПОИСКА В ЧИСЛЕННЫХ ВЕКТОРНЫХ СХЕМАХ

© 2008 С. В. Белокуров

Воронежский институт МВД России

Рассмотрены вопросы выбора и принятия решений и проблемы моделирования, встречающиеся при использовании численных векторных схем на итерациях поиска.

Выбор, механизмы, модели, численные векторные схемы, итерации поиска

С задачами выбора и принятия решений приходится сталкиваться повсеместно. Особую роль в теории выбора играет информационное обеспечение процесса отбора, так как любой выбор строится на основе тех или иных предпочтений и информации о рассматриваемых вариантах.

Выбор можно также характеризовать его свойствами. Требования к рациональному решению обычно формулируются в виде набора аксиом. Аксиоматический язык используется в теории групповых решений для определения понятий “справедливость”, “согласованность” и в теории игр для определения понятий “равновесие”, “компромисс”.

Языки принятия решений можно разделить на два класса – языки концепций выбора и языки механизмов выбора. Концепции выбора ставят в соответствие каждой ситуации набор “лучших” решений или набор свойств “лучших” решений. Язык механизмов – это язык алгоритмов выбора. На языке концепций отвечают на вопрос “что выбрать”, на языке механизмов – “как выбирать”. Язык функций выбора и аксиоматический язык – это языки концепций выбора, язык математического программирования и язык бинарных отношений – примеры языков механизмов выбора.

Следует полагать, что функция выбора представляет собой наиболее естественное, универсальное и удобное для анализа описание концепции выбора. Отсюда – целесообразность выражения в терминах функций выбора результатов, формируемых на других языках теории принятия решений.

Таким образом, для организации выбора множества лучших альтернатив на итерациях поиска будем использовать язык функций выбора [1-3].

Рассмотрим множество H – множество вариантов $\{x, y, \dots\}$. $X \subseteq H$ – непустое множество H , предъявленное для выбора; $C(X) = Y \subseteq X$ ($Y \neq \emptyset$) – выбор из X по некоторому правилу C части вариантов. Это правило и называют функцией выбора. С позиции теории выбора общая формальная модель задачи выбора может быть представлена в виде:

$$C(\bullet): \{X\} \rightarrow \{X\}, \{X\} \subseteq 2^H, \forall X \subset \{X\} \quad C(X) = Y, \quad (1)$$

где H – множество рассматриваемых вариантов $\{x, y, \dots\}$; $X \subseteq H$ – непустое множество H , предъявленное для выбора; $C(X) = Y \subseteq X$ ($Y \neq \emptyset$) – выбор из X по некоторому правилу C части вариантов, $Y \subseteq X$.

Сам процесс выбора рассматривается как “чёрный ящик”, на вход которому поступает множество рассматриваемых альтернатив $X \subseteq H$, называемое предъявлением, а на выходе получается множество $Y \subseteq X$ выбранных альтернатив, называемое выбором. Таким образом, функция выбора определяет “внешнее” описание процесса выбора.

В свою очередь “внутреннее” описание, т. е. описание того, как множество Y выделяется из X , определяется механизмом выбора, обозначаемым через $M = \langle s, p \rangle$. s – структура на множестве X (совокупность сведений, в том числе полученных от лица,

принимающего решение (ЛПР) обо всех рассматриваемых вариантах из X , позволяющих сравнивать эти варианты); p – правило выбора, которое указывает, как, используя структуру S , получить Y из X . Механизмы, порождающие одинаковую функцию выбора $C(X)$, являются эквивалентными.

Функции выбора чаще сводятся к двум основным заданиям:

1) “Поэлементное задание”, т.е. множество $Y = C(X) \subseteq X$ – это набор элементов, удовлетворяющих условиям:

$$C(X) = \{ y \in X \mid P \}, \quad (2)$$

где P – некоторый оператор, формализующий условие выбора.

2) “Целостное задание”, т.е. $C(X) = \{ Y \subseteq X \mid P \}$ есть некоторое подмножество множества X , которое в отличие от других его подмножеств удовлетворяет некоторому требованию P .

Механизмы выбора чаще представляются двумя компонентами: “структура” и “правило” выбора. При обеих формах выражения для $C(X)$ выделение Y из X опирается на некоторую заранее заданную совокупность сведений о вариантах X помимо данного исходного множества H .

Любая формализация таких сведений, использующаяся при описании механизма выбора, называется структурой и обозначается символом S . В качестве примера можно привести шкалы критериальных оценок или бинарные отношения, т.е. “структуры предпочтений”. Каждый механизм выбора M характеризуется, во-первых, заданием структуры S и, во-вторых, правилом выбора p , которое указывает, как построить множество $C(X)$ для любого $\{x \in H^0\}$ на основе данной структуры S . Здесь $H^0 = 2^H \setminus \{\emptyset\}$, т.е. множество всех непустых подмножеств H , $|H|$ – мощность H .

Если используется определение “поэлементной” формы выбора (2), то правило выбора p – это то, что записано в виде оператора P . Можно формализовать правило выбора в “поэлементной” форме:

$$p: y \in X \mid P \quad (3)$$

и аналогично в “целостной” форме:

$$p: Y \subseteq X \mid P, \quad (4)$$

где P – оператор выбора, в обоих случаях формализующий условие, которому удовлетворяют элементы $\{y\}$ или множества Y , выделяемые правилом p .

При этом в (4) корректное определение p требует, чтобы выражение на месте многоточий единственным образом определяло множество Y при любом допустимом значении X .

В зависимости от сформированной структуры S на множестве A рассматриваемых альтернатив всё многообразие механизмов выбора можно разделить на три класса: парнодоминантные, однокритериально-экстремизационные и многокритериально-экстремизационные механизмы выбора.

У парнодоминантных механизмов выбора $M = \langle \sigma, \pi \rangle$ в качестве структуры S выступают бинарные отношения разрешения (R_δ) или запрещения (R_ζ), а в качестве правила выбора

для отношения R_δ –

$$\pi: x \in C(X) \Leftrightarrow (\forall y \in X \quad x R_\delta y); \quad (5)$$

для отношения R_ζ –

$$\pi: x \in C(X) \Leftrightarrow (\exists y \in X: y R_\zeta x). \quad (6)$$

Отношения R_δ и R_ζ являются обратно дополнительными: $R_\delta = \overline{R_\zeta}^{-1}$, $R_\zeta = \overline{R_\delta}^{-1}$.

В зависимости от ограничений, накладываемых на бинарные отношения R_δ и R_ζ , выделяют следующие уровни парнодоминантного механизма выбора: если R_δ или R_ζ – ациклические отношения, то парнодоминантный механизм выбора M имеет уровень 1; если R_δ или R_ζ – ациклические и транзитивные отношения, называемые качественным порядком, строгим частичным порядком, то парнодоминантный механизм выбора M

имеет уровень 2; если R_δ или R_ζ – ациклические, транзитивные и отрицательно-транзитивные отношения, то механизм выбора M имеет уровень 3; если R_δ или R_ζ – отношения сильного порядка, то механизм выбора M имеет уровень 1 – 2 – 3.

Функция выбора, порождаемая парнодоминантным механизмом выбора:

- уровня 1 – удовлетворяет одновременно условиям наследования (H) и согласия (C):

$$\forall X, X' \quad X' \subseteq X \Rightarrow C(X') \supseteq C(X) \text{ I } X', \quad (7)$$

$$\forall X', X'' \quad X = X' \cup X'' \Rightarrow C(X) \supseteq C(X') \text{ I } C(X''); \quad (8)$$

- уровня 2 – условиям: наследования (H), согласия (C) и независимости от отбрасывания отвергнутых вариантов (O):

$$\forall X, X' \quad C(X) \subseteq X' \subseteq X \Rightarrow C(X') = C(X); \quad (9)$$

- уровня 3 – условию константности (K):

$$\forall X, X' \quad X' \subseteq X \Rightarrow \begin{cases} \text{если } \tilde{N}(X) = \emptyset, & \text{то } \delta i \ C(X') = \emptyset, \\ \text{если } C(X) \text{ I } X' \neq \emptyset, & \text{то } \delta i \ C(X') = C(X) \text{ I } X'; \end{cases} \quad (10)$$

- уровня 1 – 2 – 3 – условиям наследования (H), отбрасывания (O) и константности (K).

У однокритериально-экстремизационных механизмов выбора $M = \langle S, p \rangle$ в качестве структуры S выступает критериальная шкала. Это некоторая числовая ось j , на которую отображено множество X , позволяющая приписать каждому варианту $x \in X$ число $j(x)$, соответствующее той точке шкалы j , в которую отображён вариант. При этом, если на шкале нет точек, в которых размещено более одной альтернативы, то шкала называется строгой. В качестве p используют следующее правило:

$$п: x \in C(X) \Leftrightarrow x = \arg \min j(x) \quad (11)$$

или, что эквивалентно следующему выражению:

$$п: x \in C(X) \Leftrightarrow (\exists y \in X | j(y) < j(x)),$$

либо

$$п: x \in C(X) \Leftrightarrow (\forall y \in X \ j(x) \leq j(y)).$$

Если бинарное отношение запрещения R записать как

$$y R_\zeta x \Leftrightarrow j(y) < j(x),$$

то однокритериально-экстремизационный механизм выбора по любой критериальной шкале сводится к парнодоминантному механизму выбора, то есть является парнодоминантно представимым.

Однокритериально-экстремизационный механизм выбора используется в аксиоматических методах, где роль структуры u на множестве альтернатив A играет функция полезности; в ряде прямых методов (принцип гарантированного уровня, принцип абсолютной уступки, принцип выделения главного критерия и др.); в методах скаляризации вектора показателя качества альтернатив. В последнем случае в качестве структуры S выступает свёртка, реализуемая скалярной функцией j , сопоставляющей векторной оценке качества $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ каждого решения скалярную интегральную оценку качества $j(x)$.

Многокритериально-экстремизационные механизмы выбора используются в тех случаях, когда из допустимого множества альтернатив необходимо выделить подмножество недоминируемых вариантов. В качестве структуры S здесь выступает вектор показателей качества $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, а в качестве p используется правило выбора Парето:

$$п: x \in C(X) \Leftrightarrow (\forall y \in X \ \forall j \ x_j \leq y_j \wedge \exists j_0 | x_{j_0} < y_{j_0}), \quad (12)$$

Если бинарное отношение разрешения R_δ записать как

$$x R_{\delta} y \Leftrightarrow (\forall j \ x_j \leq y_j \wedge \exists j_0 \mid x_{j_0} < y_{j_0}),$$

то можно убедиться, что оно является ациклическим и транзитивным, но не отрицательно-транзитивным отношением, и многокритериально-экстремизационный механизм выбора совпадает с классом парнодоминантных механизмов уровня 2.

Рассматривается и так называемый механизм выбора с нечувствительностью (механизм интервального выбора), являющийся обобщением однокритериально-экстремизационного механизма. В этом случае при сравнении оценок $j(x)$ и $j(y)$ показателей качества вариантов решений $x, y \in A$ имеется допуск (зона нечувствительности) $\hat{a} \geq 0$ такой, что y превосходит x лишь при условии $j(y) - j(x) > \hat{a}$. Правило выбора p записывают в следующем виде:

$$p: y \in C(X) \Leftrightarrow (y \in X \wedge \exists x \in X \mid j(x) - j(y) > \hat{a})$$

Любой механизм выбора лучших вариантов по шкале с нечувствительностью является парнодоминантно представимым механизмом.

В литературе также рассматривается и многокритериальный механизм выбора с нечувствительностью $\hat{a} = \hat{a}(y)$. В качестве структуры в нём выступают вектор оценок показателей качества $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ и набор функций $\{\hat{a}_j\}$, $\hat{a}_j \geq 0$, $j = \overline{1, m}$, характеризующих “нечувствительность” ЛППР по оценкам показателей качества сравниваемых альтернатив. Правило выбора p записывается в виде:

$$p: y \in C(X) \Leftrightarrow (y \in X \wedge \exists x \in X \mid \forall j = \overline{1, m} \ x_j - y_j > \hat{a}_j).$$

Следует заметить, что, согласно терминологии, парнодоминантные механизмы выбора (11) и (12), записанные в виде (5), (6), называют оптимизационными механизмами доминирования (5) и блокировки (6), определяемыми бинарным отношением R в версии разрешения.

Согласно вышеизложенному, можно утверждать, что важной особенностью этапа выбора является наличие дополнительной информации о предмете выбора, которую

особенно в векторном случае недоминируемых альтернатив часто способен предоставить только ЛППР. В зависимости от возможностей выявления у ЛППР требуемой дополнительной информации о рассматриваемых вариантах решений, используемой для формирования структуры S на множестве X , можно выделить классы априорных, апостериорных и адаптивных моделей выбора.

В априорных моделях требуемой дополнительной информацией является некий принцип оптимальности Opt , в соответствии с которым формулируется правило выбора p . Оператор Opt представляется в явном виде либо формульным соотношением между оценками свойств альтернативы, либо понятием лучшего решения, определение которого становится возможным на основе бинарного отношения доминирования на множестве оценок.

В основе апостериорных моделей лежит предположение о том, что формальная модель задачи выбора не содержит достаточной информации, по которой ЛППР может сформулировать соответствующей целевой установке принцип оптимальности. Поэтому здесь ставится задача полного восстановления принципа оптимальности на всём рассматриваемом множестве альтернатив в явном виде на частичной дополнительной информации. Восстанавливаемый принцип оптимальности задаёт формальную модель описания системы предпочтения ЛППР.

В адаптивных моделях задачи выбора не предполагается введение или полное восстановление принципа оптимальности в явном виде. Здесь информация о предпочтениях ЛППР используется непосредственно на итерациях поиска лучшей альтернативы. Таким образом, в адаптивных моделях решается задача оптимизации по неявно заданному принципу оптимальности. Здесь можно отметить человеко-машинные методы, использующие преимущества интерактивного режима решения задач.

Рассмотренные выше априорные, апостериорные и адаптивные модели задач выбора используются для решения численных векторных схем, однако не формализовались ранее на итерациях поиска. Это позволило

бы создать мощные, универсальные, гибкие в настройке алгоритмы и модели выбора, использовать интерактивные диалоговые процедуры корректировки поиска.

Библиографический список

1. Белокуров, С. В. Синтез функций выбора на итерациях поиска в численных моделях многокритериальной оптимизации [Текст] / С. В. Белокуров, Ю. С. Сербулов, С. В. Величко и др. - Воронеж: Научная книга, 2003. – 95 с.

2. Белокуров, С. В. Задача выбора оптимальных вариантов на основе вероятностного подхода [Текст] / С. В. Белокуров, В. И.Сумин, М. В. Питолин и др. // Вестник ВГТУ. - Сер. Радиоэлектроника и системы связи. - 2006. - № 7. - С. 59-62.

3. Белокуров, С. В. Математические модели в условиях динамики рыночной транспортной среды [Текст] / С. В. Белокуров, А. В. Кононова // Экономика и производство. - 2007. – № 1. - С. 20-23.

References

1. Belokurov, S. V. Synthesis of choice functions on search iterations in numerical models of multicriterial optimization / S. V. Belokurov, Yu. S. Serbulov, S. V. Velitchko et al. – Voronezh: Nauchnaya kniga, – 2003 – 95 pp.

2. Belokurov, S. V. Problem of choosing optimal variants on the basis of the probability approach/S.V.Belokurov, V.I.Sumin, M.V. Pitolin

et al. // Vestnik of Voronezh State Technical University. – Series: Radioelectronics and communication systems. – 2006 – No. 7 – pp. 59-62.

3. Belokurov, S. V. Mathematical models in the context of market transport environment dynamics / S. V. Belokurov, A. V. Kononova // Ekonomika i proizvodstvo (Economy and production) – 2007 – No. 1. – pp. 20-23.

MODELS AND ALGORITHMS OF CHOOSING SOLUTIONS ON SEARCH ITERATIONS IN NUMERICAL VECTOR SCHEMES

© 2008 S. V. Belokurov

Voronezh Institute of Ministry of Internal Affairs of Russia

The paper deals with the problem of choice and taking decisions as well as with the problems of modelling that occur when using numerical vector schemes on search iterations.

Choice, mechanisms, model, numerical vector schemes, search iterations

Информация об авторе

Белокуров Сергей Владимирович, преподаватель кафедры Информационно-технического обеспечения ОВД, к. ф.-м. н., доцент Воронежский институт МВД России. Область научных интересов - Методы системного моделирования, теории векторной оптимизации и экстраполяции экспертных оценок, теории выбора и принятия решения, вычислительной математики, теории графов, структурного и системного программирования, новые информационные технологии, модели и алгоритмы для организации и управления движением городского пассажирского транспорта.

Belokurov, Sergey Vladimirovitch, lecturer of the department of information-and-technical support of the Internal Affairs candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh Institute of Ministry of Internal Affairs of Russia. Area of research: methods of system modeling, theories of vector optimization and expert assessment extrapolation, theories of choice and taking decisions, computing mathematics, graph theory, theory of structural and system programming, new information technologies, models and algorithms for organizing and controlling city passenger traffic.

МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ ПОМОЩИ ЭКИПАЖУ

© 2008 А. А. Воронцов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Рассматривается представление знаний в экспертной системе помощи экипажу воздушного судна для предметной области «Действия экипажа воздушного судна в особых ситуациях». Предложена комбинированная иерархическая модель представления знаний, основанная на объектном подходе, продукционных правилах и структуре сети Петри. Разработанное представление знаний позволяет формировать целостную модель предметной области для анализа базы знаний и механизма вывода на знаниях.

Экспертная система, представление знаний, предметная область, система помощи экипажу, принятие решений, механизм вывода

Сложность современной авиационной техники требует от экипажа воздушного судна (ВС) владения значительным багажом знаний о системах самолёта и осуществления в реальном времени анализа большого объёма поступающей информации. Данное обстоятельство вызывает рост психофизической нагрузки на экипаж и во многом обуславливает увеличение числа авиационных происшествий по вине «человеческого фактора» [1].

Помочь в сложившейся ситуации призваны бортовые экспертные системы-советчики, которые из всего информационного потока должны предоставлять экипажу данные, актуальные на текущий момент, и рекомендации по необходимым действиям в сложившейся обстановке.

В данной статье рассматриваются принципы построения экспертной системы помощи экипажу (ЭСПЭ) ВС для предметной области (ПО) «Действия экипажа ВС в особых ситуациях». Особой ситуацией (ОС) называется состояние параметров ВС и внешней среды в результате воздействия неблагоприятных факторов, ведущее к снижению безопасности полёта.

Главной целью работы ЭСПЭ в рассматриваемой ПО является безопасное выполнение полёта, достижению которой могут воспрепятствовать возникающие на борту ОС. В зависимости от текущего этапа полёта возникновение ОС требует от членов экипажа выполнения определённой последовательно-

сти действий, регламентируемых «Руководством по лётной эксплуатации» (РЛЭ) для данного ВС и другими нормативными документами. Выполняя предписанные действия, экипаж изменяет состояние параметров ВС и внешней среды, стремясь парировать негативное развитие ОС. Таким образом, для обеспечения достижения главной цели ЭСПЭ должна осуществлять анализ текущего состояния параметров ПО на предмет возникновения ОС и формировать для каждого члена экипажа рекомендации по её ликвидации.

При разработке ЭСПЭ приходится решать исследовательские задачи по следующим направлениям:

1. Анализ и структурирование ПО.
2. Выбор или разработка модели представления знаний (МПЗ) с учётом специфики ПО.
3. Разработка или адаптация (с учётом принятой МПЗ) механизма вывода для системы вывода на знаниях (СВЗ).
4. Формирование и анализ базы знаний (БЗ).

В результате проведённых исследований для адекватного описания ПО было выделено три уровня представления знаний:

1. Первый – нижний уровень содержит декларативные знания об отдельных элементах ПО (оборудовании ВС, экипаже, внешней среде и т.п.).
2. Второй – средний уровень содержит процедурные знания и описывает правила взаимодействия знаний нижнего уровня меж-

ду собой: условия возникновения ОС и описания действий элементов ПО.

3. Третий – верхний уровень описывает ПО как взаимосвязанную структуру знаний нижних уровней, задавая модель ПО для использования её при анализе и выводе на знаниях.

Выделение в ПО трёх указанных уровней представления потребовало разработки комбинированной иерархической МПЗ с учётом особенностей знаний на каждом уровне.

В разработанной комбинированной МПЗ для описания знаний нижнего уровня предложено использовать объектный подход [2], где каждый элемент ПО представляется в виде объекта, характеризующегося набором своих атрибутов, вида: {Объект.Атрибут <значение>}. Совокупность всех текущих значений атрибутов для всех объектов определяет текущее состояние ПО и представляет собой базу данных экспертной системы. Между объектами нижнего уровня может быть установлена семантическая связь «ЧАСТЬ – ЦЕЛОЕ», задающая иерархию объектов (рис. 1).

Такое объектное иерархическое представление знаний нижнего уровня обеспечило простоту анализа и структурирования ПО при работе с экспертами и документацией по формированию БЗ.

Для знаний ПО среднего уровня в ЭСПЭ разработана МПЗ, полученная на основе синтеза объектной модели и продукционных правил. Полученные в результате синтеза МПЗ объекты-правила в качестве ядра содержат продукционное правило (ПП) вида «ЕСЛИ А, ТО Б», в которых в качестве операндов «А» и «Б» используются утверждения о состоянии атрибутов объектов – знания нижнего уровня (1):

$$\{ \text{Объект.Атрибут} \langle \text{значение} \rangle \} \{ \text{отношение} \} \{ \text{Эталонное значение} \}. \quad (1)$$

Например, {Самолёт}.{Высота (м) <>} { = } {7000}.

В выражении (1) в качестве эталонного значения может выступать не только константа или значение атрибута другого объекта, но и результат вычисления функции: {Объект.Атрибут <значение>} {отношение} {Функция([Аргумент1],..., [Аргумент N])}. Применение таких функций позволяет при необходимости реализовать дополнительные возможности, например, контроль внешних процессов, организацию информационного обмена, работу с нечёткими знаниями и нейросетями.

Для представления знаний ПО на среднем уровне в ЭСПЭ существуют два основных типа объектов-правил: объекты-прави-

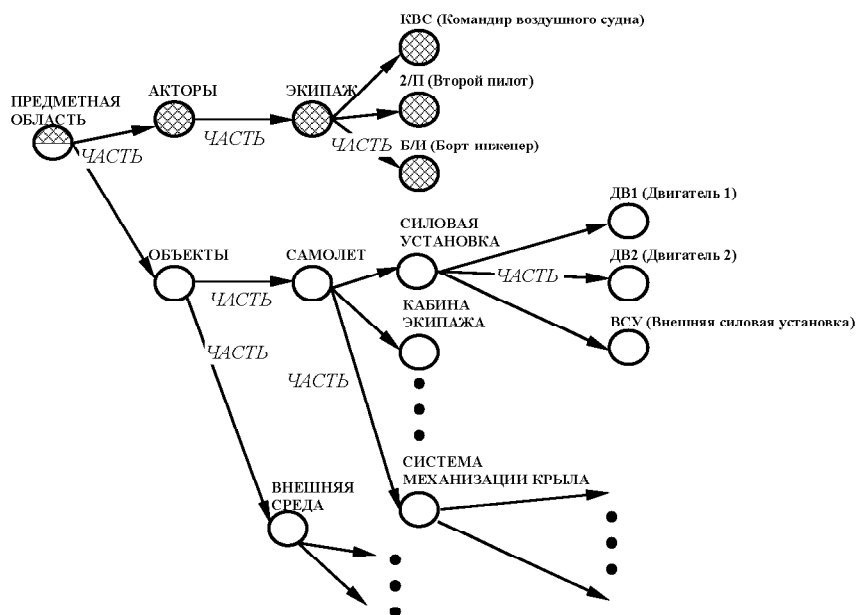


Рис. 1. Фрагмент иерархического дерева объектов

ла, описывающие условия возникновения ОС (далее описания ОС), и объекты-правила, описывающие действия.

Описание ОС можно представить при помощи таблицы 1.

Возникновение ОС определяется по наличию набора её отличительных признаков, которые задаются в виде конъюнкций выражений (1) (выделенные строки таблицы 1). Если конъюнкция истинна, то признак считается активным. Каждому признаку на основе экспертного анализа ставится в соответствие его вес. Веса активных признаков суммируются и, если полученная сумма превышает заданную величину – порог приня-

тия решения (ППР), то делается вывод о наличии ОС. Для упорядочивания обработки ОС в качества одного из атрибутов её описания вводится величина «степени опасности ОС», т.е. показатель того, насколько одна ОС потенциально опасней другой. Величина степени опасности ОС зависит от этапа полёта и рассчитывается на основе экспертных оценок. В ЭСПЭ для этого применяется метод парных сравнений.

Таким образом, описание ОС состоит из ПП, определяющих активность признаков на основе анализа знаний нижнего уровня, и ПП, сопоставляющего веса активных признаков с ППР.

Таблица 1. Представление описания ОС

Свойство		Значение				
Название ОС		Пожар двигателя 1				
ППР		40				
Степень опасности	Этап	Взлет	Маршрут	Снижение	Посадка	Руление
	Значение	90	85	85	90	50
Описание признаков						
№ Объекта	Объект	Атрибут	Отношение	Значение	Вес	
1.1.9.1	Речевое сообщение	Текст	=	ПРОВЕРЬ ПОЖАР	20	
1.1.3.1.1	Табло ПОЖАР	Текст	=	ПОЖАР	20	
1.1.1.1.1	Табло ДВ1 ПОЖАР	Текст	=	ДВ 1 ПОЖАР	20	
1.1.3.5.1	Кадр ДВ/СИГН	Текст	CON	ДВ 1 ПОЖАР	20	
1.1.2.1.1	Табло ДВ1 ОТКЛЮЧИ	Текст	=	ДВ1 ОТКЛЮЧИ	20	
1.1.1.1.11	Переключатель ДВ1 ОЧЕРЕДЬ 1	Надпись	=	ВКЛ	20	
1.1.1.1.8	Табло ОЧЕР 1 РАЗРЯД	Текст	-	ОЧЕР 1 РАЗРЯД	20	

Описание действий можно представить в виде таблицы 2.

Продукционное ядро при этом имеет составную конструкцию вида:

«ЕСЛИ: <Условие>, ТО [Если <Операция>, то <Реакция>]».

Часть <Условие> определяет активность правила, часть <Операция> описывает требуемое действие, а часть <Реакция> позволяет контролировать выполнение рекомендаций, изменять состояния атрибутов объектов и моделировать работу ЭСПЭ. В частном случае одна из частей ядра может отсутствовать. Для устранения конфликтов между описаниями действий экспертным

путём им назначаются приоритеты. Так как необходимость выполнения конкретного действия актуальна при наличии определённой ОС на конкретном этапе полёта, а само действие должно быть выполнено конкретным членом экипажа, то данная информация задаётся в таблице описания действий в качестве атрибутов. Введение в МПЗ для описания действий атрибутов обеспечило использование при выводе на знаниях только актуальных ПП и сделало выдачу рекомендаций более оперативной и адресной. Работа ЭСПЭ с каждым членом экипажа при этом происходит по принципу классной доски.

Применение для среднего уровня представления знаний ПО МПЗ на основе синте-

Таблица 2. Представление описания действий

ОС	Полет со всеми неработающими двигателями		
Исполнитель	Б/И (бортинженер)		
Этап полета	Маршрут		
Приоритет	50		
ЯДРО			
Объект	Атрибут	Отношение	Значение
Условие			
ВБМ	Показание высоты	IN	[1500; 5000]
ВСУ	Состояние	=	Включена
Операция			
Переключатель ГВСУ	Положение	=	Нажат
Реакция			
Переключатель ГВСУ	Надпись	=	ВКЛ
Переключатель ГВСУ	Цвет	=	Зеленый

за продукций и объектного подхода позволило эффективно организовать процесс анализа ПО и формирования БЗ, так как хорошо соотносится со способом подачи информации, используемым в РЛЭ и других нормативных документах, и не вызвало особых затруднений при работе с экспертами.

Представление знаний ПО среднего уровня при помощи МПЗ с использованием продукций позволяет использовать для вывода на знаниях традиционную схему вывода в продукционных системах (рис. 2), модифицированную с учётом использования двух типов объектов-правил.

На этапе выборки осуществляется определение подмножества правил в соответствии с активной ОС. Если в системе не активна ни одна из ОС, то рассматриваются только правила описания ОС. На этапе сопоставления по результатам анализа условий продукций определяется, какие правила готовы к выполнению, и формируется конфликтный набор правил. На этапе разрешения конфликтов механизм вывода выбирает одно правило, которое будет выполняться в текущем цикле. На этапе выполнения осуществляется выполнение выбранного правила и изменение рабочей памяти.

В алгоритме применяются следующие стратегии, перечисленные в порядке очередности использования:

1. Правила определения ОС рассматриваются первыми.

2. Если в конфликтном наборе содержится несколько правил ОС, то первым выбирается то правило, которое относится к наиболее опасной ОС.

3. Среди правил действий первыми выбираются правила, которые относятся к наиболее опасной ОС.

4. Среди правил действия выбираются правила с наибольшим приоритетом.

Приведённая на рис. 2 общая схема алгоритма требует значительных затрат времени и ресурсов, даже несмотря на группирование ПП по ОС и этапам полёта, так как требует повторного сопоставления данных и правил на каждом цикле работы.

Для минимизации вычислений и исключения повторного сопоставления данных, не изменившихся на предыдущем цикле работы системы, применяют индексирование правил [3], что подразумевает формирование единой структуры, устанавливающей связи между ПП и объектами ПО.

Такую структуру в ЭСПЭ призван обеспечить верхний уровень представления знаний. В большинстве случаев при разработке продукционных экспертных систем этап формирования единой структуры знаний ПО передаётся в СВЗ, что приводит к тому, что БЗ таких систем представляет собой набор не связанных друг с другом ПП, а анализ таких БЗ весьма сложен.

В ЭСПЭ в качестве основы для формирования единой структуры ПО на верхнем

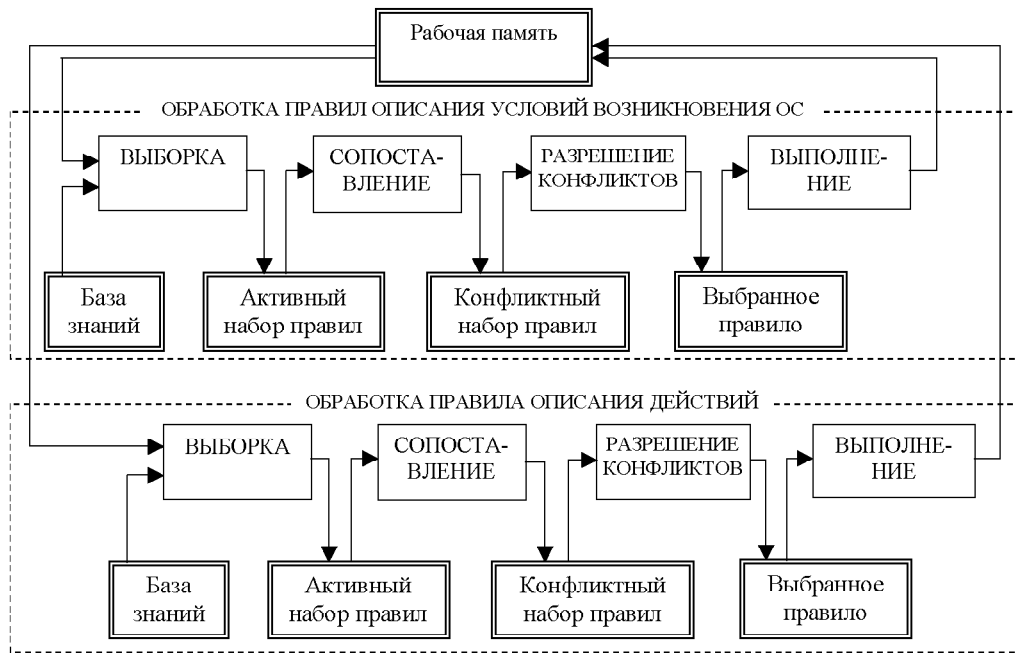


Рис. 2. Схема общего алгоритма вывода ЭСПЭ

уровне представления знаний применён математический аппарат сети Петри (СП).

СП применяют для моделирования работы систем и управления процессами. Если же позициям СП поставить в соответствие выражения вида (1), а срабатывание перехода рассматривать как выполнение ПП, то механизм СП можно использовать как алгоритмическую основу для вывода на производствах [4]. Данный подход и применён в ЭСПЭ.

На рис. 3 показан пример представления при помощи СП продукционного ядра объекта-правила для описания ОС. Атрибуты описания ОС при этом используются для группирования и взаимной диспетчеризации описаний ОС.

Из рис. 3 видно, что определение наличия ОС происходит в два этапа: 1) определение суммы весов активных признаков и 2) сравнение суммы весов с ППР.

Пример использования СП для описания действий показан на рис. 4. Заметим, что для связи частей <Условие> → <Операция> и <Операция> → <Реакция> вводится специальная вспомогательная позиция (позиция P_5).

Объединение СП, соответствующих отдельным объектам-правилам, в единую СП позволяет представить ПО в виде интегрированной структуры знаний нижнего и среднего уровня и формирует верхний уровень представления знаний.

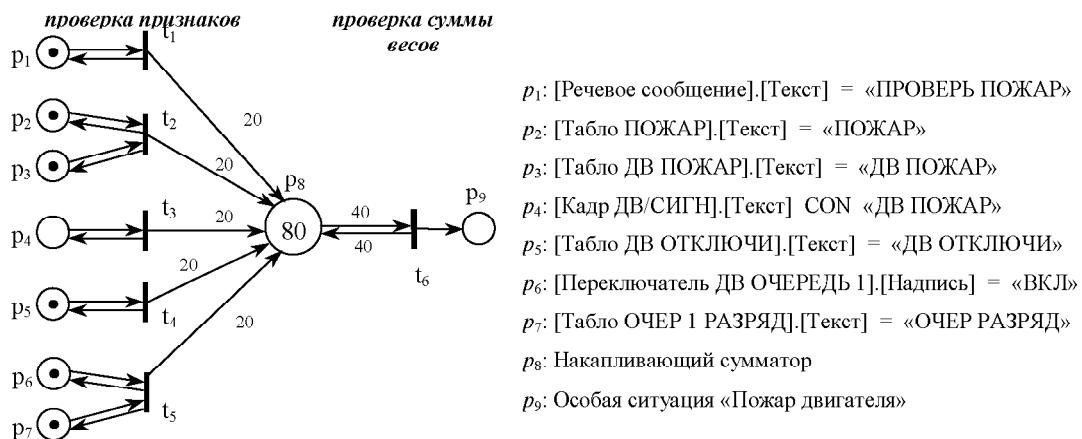


Рис. 3. Пример сети Петри для правила описания ОС

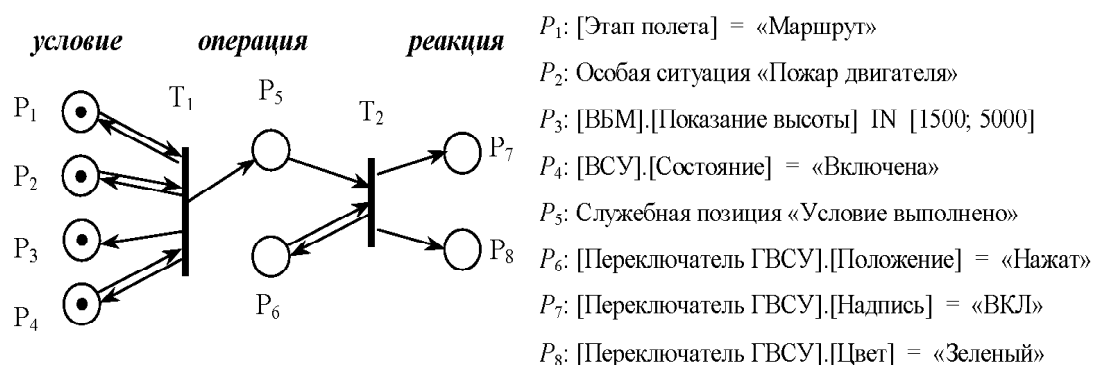


Рис. 4. Пример сети Петри для правила описания действия

Следует отметить, что представление ПО при помощи СП в ряде случаев не позволяет установить точное соответствие элементов СП элементам в ПО. Данная особенность возникает при формировании БЗ и может быть обусловлена различными причинами. Например, ввод вспомогательных позиций (рис. 4) или переходов при устранении разрывов в сети, а также замена сложных логических выражений вида «Если ... или ..., то ...» набором элементарных конъюнкций.

Достоинством представления знаний с помощью СП в ЭСПЭ стала возможность более эффективной организации процесса вывода на производствах, т.к. минимизируются вычисления на этапе сопоставления. Это происходит за счёт того, что на каждом цикле работы механизма вывода необходимо анализировать активность только тех правил, для которых был изменён статус входных позиций, что отслеживается при помощи разметки СП. Таким образом, СП выполняет функцию индексирования правил.

Главным положительным эффектом применения СП является то, что оно позволило получить не только структуру знаний верхнего уровня, но и обеспечило формирование модели, описывающей процесс взаимодействия знаний между собой. Данный эффект использования СП обеспечил переход от сетевого структурирования к сетевому моделированию, что даёт возможность проводить анализ взаимодействия отдельных знаний уже на этапе формирования БЗ. При

этом применение СП позволило многие практические вопросы анализа СП (поиск конечных и начальных состояний, локализация разрывов, поиск конфликтующих правил) свести к ряду хорошо известных задач анализа СП: достижимости, активности, живости и др.

Предложенная комбинированная иерархическая МПЗ совместно с алгоритмом вывода на знаниях на основе СП нашли применение при создании программного комплекса наземного макета ЭСПЭ «База знаний по предотвращению неблагоприятного развития ОС», который используется в ФГУП НИИАО для проведения исследований по отработке технологий построения бортовой экспертной системы.

Библиографический список

1. Никифоров С. П. Бортовые средства повышения безопасности полёта транспортных самолётов. Система интеллектуальной поддержки экипажа в особых ситуациях. – Жуковский: НИИАО, 1999.
2. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е издание / Пер. с англ. - М.: ИД «Вильямс», 2007.
3. Яковлев К. В. Сетевая модель вывода в производственных системах // Труды Шестого международного симпозиума «Интеллектуальные системы». - Саратов, 2004.
4. Плотников В. Н., Суханов В. А. Системы, основанные на знаниях. - М.: Изд-во МГТУ, 1995.

References

1. S. P. Nikiforov. Airborne facilities for increasing transport aircraft flight safety. System of crew intellectual support in emergencies. Zhukovsky: Aviation Equipment Research Institute, 1999.
2. D. Jarratano, G. Riley. Expert systems: principles of developing and programming, 4th edition/. Transl. from English. Moscow: Publishing House «Williams», 2007.
3. K. V. Yakovlev. Conclusion network model in production systems.// Transactions of the sixth international symposium «Intellectual systems». – Saratov, 2004.
4. V. N. Plotnikov, V. A. Sukhanov. Systems based on knowledge. – Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University, 1995.

MODEL OF KNOWLEDGE IN THE EXPERT SYSTEM OF AID TO THE CREW

© 2008 A. A. Vorontsov

Moscow State Technical University named after Bauman

The paper deals with knowledge formation in the expert system of aid to the aircraft crew for the subject area «Aircraft crew actions in emergency situations». A combined hierarchical model of knowledge formation is proposed, based on object approach, production rules and Petri network structure. The knowledge formation developed makes it possible to form an integral model of the subject area for the analysis of database and knowledge conclusion mechanism.

Expert system, knowledge formation subject area, system of aid to the crew, decision taking, conclusion mechanism

Информация об авторе

Воронцов Андрей Андреевич, начальник департамента строительства и эксплуатации стенда «Электронная птица». Место работы: Закрытое акционерное общество «Гражданские самолёты Сухого», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: экспертные системы, системы помощи экипажу, обработка знаний, системы управления.

Vorontsov Andrey Andreyevitch, Head of department of construction and maintenance of the “Electronic bird” testing ground. Office: Private joint-stock company “Sukhoi Civil Aircraft”, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Area of research: expert systems, systems of aid to the crew, knowledge processing, control systems.

УДК 681.518.3:541.18

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИИ

© 2008 Л. С. Зеленко¹, В. В. Варфоломеева¹, В. Ю. Кузнецов¹,
А. В. Федькаев¹, А. В. Терентьев¹, А. К. Буряк²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Институт физической химии и электрохимии РАН, г. Москва

Разработана автоматизированная система расчёта термодинамических характеристик адсорбции (ТХА), позволяющая моделировать процесс физической адсорбции для молекул разных классов органических соединений на поверхности графитированной термической сажи (ГТС). Система позволяет проводить расчёты для молекул, обладающих способностью к внутреннему вращению, при всех возможных конформациях. Реализована возможность построения 3D-модели, позволяющая проверить правильность ввода исходных геометрических параметров молекулы, а также экспорт полученных данных в табличный процессор MS EXCEL для дальнейшей их обработки. Возможности системы продемонстрированы на примере практически важных молекул в сопоставлении с экспериментальными данными.

Термодинамические характеристики, константа Генри, теплота адсорбции, адсорбция, графитированная термическая сажа, атом-атомные потенциалы, эксперимент, молекулярно-статистический метод расчета, моделирование, автоматизированная система

Введение. Автоматизированная система расчёта термодинамических характеристик адсорбции, таких, как константы Генри (K_1) и теплоты адсорбции (q), предназначена для исследования адсорбционного и хроматографического поведения соединений разных классов и имеет важное научное и практическое применение в физической и аналитической химии. В качестве объектов исследования выбраны соединения, являющиеся компонентами или микрокомпонентами углеводородных топлив или продуктами их трансформации. Разработка системы является актуальной, так как расширяет область применения молекулярно-статистического метода расчёта ТХА на новые классы органических веществ.

Накопление больших массивов данных по ТХА позволит рассматривать большие ряды гомологов и изомеров. Внутри этих рядов для конкретных молекул можно будет рассматривать адсорбцию всех конформационных изомеров. Поскольку конформационных изомеров и изомеров положения очень много, особенно для углеводородов, то такие расчёты будут важны для исследования свойств углеводородных топлив.

Для расчёта термодинамических характеристик адсорбции необходимо задавать и варьировать различные геометрические параметры молекулы, в первую очередь межатомные расстояния r , валентные углы α и торсионные (двухгранные) углы t (рис. 1). Кроме того, необходимо задавать и в некоторых случаях варьировать и физико-химические параметры, такие, как атомная поляризуемость, диамагнитная восприимчивость и равновесное расстояние.

В настоящее время для расчёта одной конформации (ввода данных, сведения результатов в таблицы) при использовании известной программы расчёта ТХА [1] в среднем затрачивается 2-4 минуты. В случае поворота вокруг одной оси вращения на 360° с шагом 10° необходимо провести расчёты 36 конформаций. Если в молекуле, к примеру, три оси вращения, то необходимо рассчитать 46656 (36^3) конформаций.

На практике часто встречаются молекулы с числом осей вращения больше трёх, для которых провести варьирование углов по всем осям ранее не представлялось возможным из-за временных ограничений. Кроме того, автоматизация расчётов позволяет

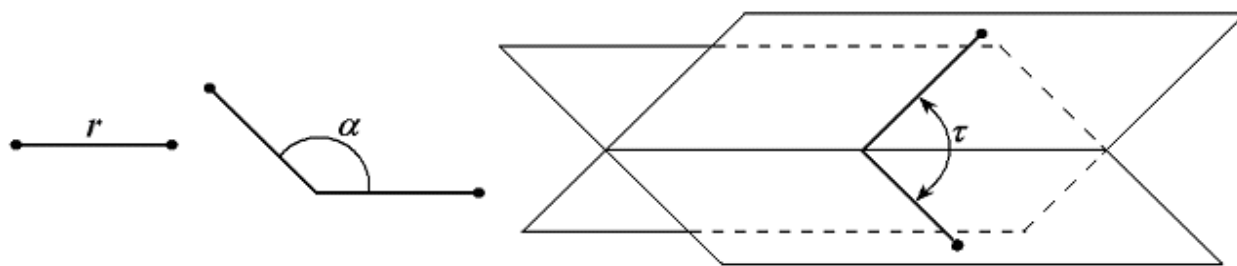


Рис. 1. Основные структурные параметры молекул

уменьшить шаг варьирования. Это, в свою очередь, позволяет оптимизировать геометрическую структуру молекулы и получать корректные атом-атомные потенциалы (ААП), особенно для молекул с неизвестной структурой при количественном сопоставлении их с экспериментальными данными. В случае изомеров только с помощью расчётов ТХА на основе реальных данных о структуре молекул можно провести их надёжную идентификацию. Такое исследование выполнено для изомеров метилтриазола, азотсодержащих продуктов трансформации несимметричного диметилгидразина (НДМГ) [2].

Математическое описание молекулярно-статистической теории адсорбции. Главной причиной развития и совершенствования молекулярно-статистических расчётов на ГТС является то, что адсорбция на её поверхности чрезвычайно чувствительна к структуре молекул и позволяет разделять геометрические изомеры [3, 4]. Наибольшее развитие молекулярно-статистические расчёты получили для системы «графитированная термическая сажа – углеводороды и их производные» [5]. В работах [5, 6] разработан полуэмпирический молекулярно-статистический метод расчёта термодинамических характеристик физической адсорбции газов на ГТС при предельно низких степенях заполнения её поверхности, позволяющий проводить исследования поведения молекул, в том числе изомерных, при адсорбции на ГТС. На основании расчётов можно предсказать, взаимодействие какого изомера с поверхностью ГТС будет сильнее и, соответственно, в каком порядке эти соединения будут выходить из колонки с ГТС.

При расчётах сделано допущение, что молекулы являются квазижесткими, так как у большинства молекул амплитуды колебаний ядер весьма малы по сравнению с межъядерными расстояниями.

В рамках молекулярно-статистического метода расчёты константы Генри для адсорбции квазижестких молекул приводят по уравнению

$$K_1 = \frac{1}{4p} \iint \left(\frac{2pkT}{\Phi_z''} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Phi_0}{kT}\right) \sin \Theta d\Theta d\Psi, \quad (1)$$

где Φ_0 и Φ_z'' – значения потенциальной функции Φ взаимодействия между молекулами адсорбата и адсорбента в потенциальном минимуме и её второй производной по расстоянию z центра масс молекулы от поверхности адсорбента; Q и Y – углы Эйлера, определяющие ориентацию молекулы относительно поверхности адсорбента.

Величины Φ_z'' , Φ_0 и равновесное расстояние z_0 зависят от Q и Y . Потенциальную функцию Φ представляют в виде суммы ААП взаимодействия каждого атома адсорбируемой молекулы (A) с каждым атомом углерода ГТС ($C_{ГТС}$):

$$\Phi = \sum_A \sum_{C_{ГТС}} j_{AC_{ГТС}}. \quad (2)$$

Молекулярно-статистический расчёт базировался на использовании полуэмпирических ААП в форме Бакингема-Корнера [7]:

$$j_{AC_{ГТС}} = -C_6 r^{-6} - C_8 r^{-8} + B e^{-qr}, \quad (3)$$

где C_6 , C_8 – параметры потенциала диполь-дипольного и диполь-квадрупольного дис-

персионного взаимодействий; r – межатомное расстояние; B и q – параметры потенциала отталкивания.

Суммирование j по атомам углерода ГТС над базисной гранью графита проводят с использованием приближения Крауэлла. Потенциальную функцию Φ_i взаимодействия i -атома молекулы с базисной гранью графита рассчитывают по уравнению

$$\Phi_i = -C_{6,i} \frac{pJ}{2d^4} z \left[\frac{z_i}{d}, 4 \right] - C_{8,i} \frac{pJ}{3d^6} z \left[\frac{z_i}{d}, 6 \right] + \frac{2B_i pJ}{q^2} (qz_i + 1) e^{-qz}, \quad (4)$$

где $J = 0,382 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-2}$ – число атомов углерода, приходящееся на единицу площади базисной плоскости графита; d – межплоскостное расстояние в графите, равное 0,356 нм; z – дзета-функция Римана; z_i – расстояние от рассматриваемого i -атома до плоскости, проходящей через центры атомов наружного атомного слоя графита.

В выражении (4) учитывается вклад в энергию отталкивания только от наружного атомного слоя графита.

Значения параметров ААП взяты из работ [7, 8] и приведены в таблице 1.

В работе рассматривается нелокализованная адсорбция (свободное движение по математически однородной поверхности).

Таблица 1. Значения параметров ААП при взаимодействии различных атомов с атомом углерода ГТС

Элемент	Параметр ААП		
	$C_6, \frac{\text{кДж} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}}$	$C_8, \frac{\text{кДж} \cdot \text{м}^8}{\text{моль}}$	$B, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
Водород	-0.5672	-0.06403	1618.000
Углерод (Sp^3)	-1.5750	-0.14530	8491.000
Углерод (Sp^2)	-1.6853	-0.15547	9085.370
Кислород	-1.1194	-0.11005	3250.015
Сера	-3.8672	-0.45069	26759.806

Межмолекулярное взаимодействие адсорбат-адсорбат не учитывалось, расчёты проводились для области Генри.

Разработанная система позволяет проводить расчёты для всех значений углов внутреннего вращения с любым шагом варьирования в автоматическом режиме.

Описание автоматизированной системы расчёта ТХА. Описание работы системы рассмотрим на примере молекулы 2-фенилэтанола $C_6H_5-CH_2-CH_2-OH$, структура которой представлена на рис. 2.

Для решения поставленных задач пользователю в системе предоставляются

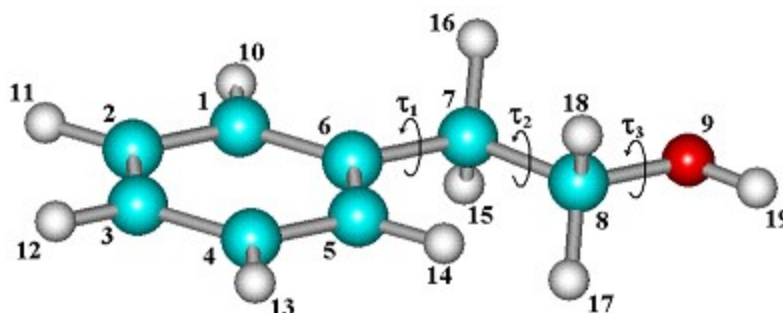


Рис. 2. Шаро-стержневая модель молекулы 2-фенилэтанола

следующие функции: возможность задания параметров молекулы и параметров для расчёта ААП сортов атомов (рис. 3), проведение расчётов ТХА (теплота адсорбции, константа Генри) и расчёта положения молекулы в пространстве.

Ввод данных в систему возможен как в режиме диалога, так и через загрузку файла определённого формата. Обмен данными че-

рез файловую систему будет полезен при «стыковке» данной системы с другими системами моделирования процессов физической адсорбции, а также для создания «библиотеки» с данными о молекулах и её изомерах, наиболее часто используемых в экспериментах. Входные данные представлены в виде таблицы, в первом столбце которой находятся порядковые номера атомов молеку-

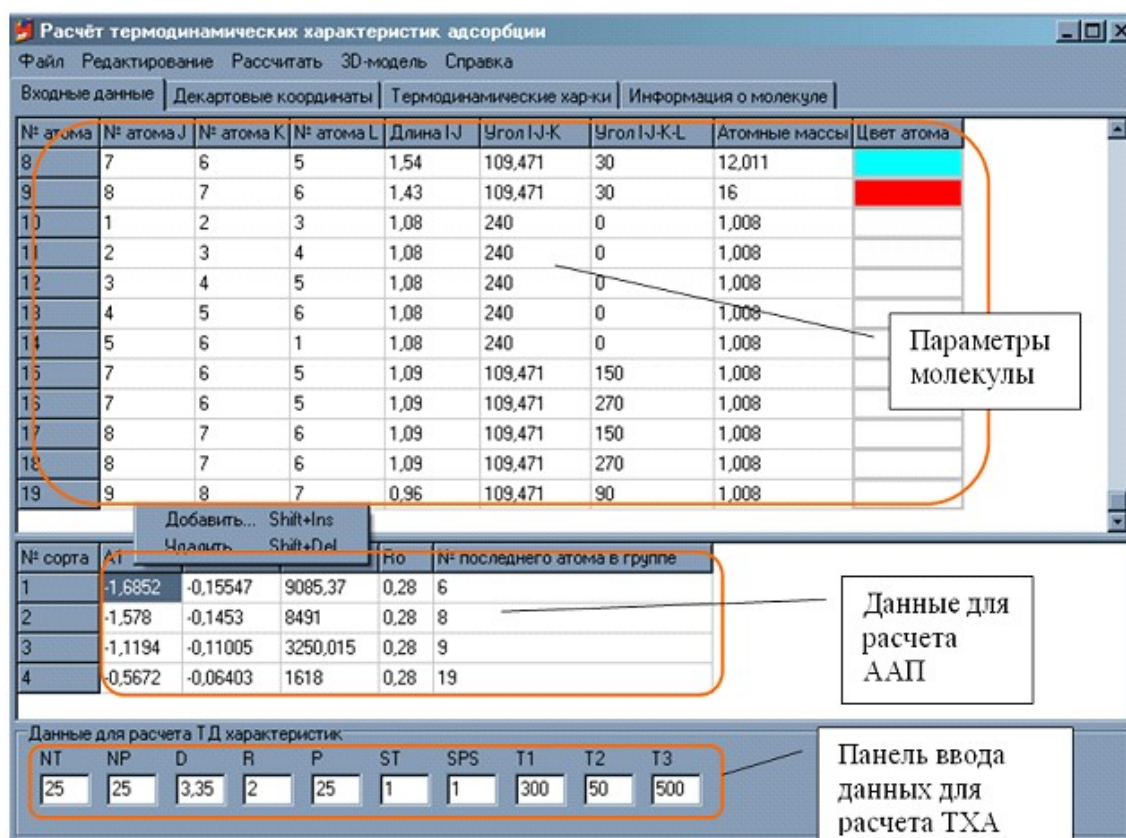


Рис. 3. Режим ввода параметров молекулы

лы. В рассматриваемом случае (рис. 2) первые шесть номеров – это атомы углерода бензольного кольца. Номера «7» и «8» – sp^3 -гибридизованные атомы углерода. Девятый атом – кислород. Атомы «10» – «14» – атомы водорода, связанные с углеродом бензольного кольца. «15», «16» и «17», «18» – атомы водорода, связанные с C_7 и C_8 , соответственно. «19» – атом водорода спиртовой группы OH.

Во 2-ом, 3-ом и 4-ом столбцах записываются соответственно номера атомов «J», «K», «L». В пятый столбец заносятся значения длин связей между атомами «I-J». В шестой – значения угла, образованного атомами «I-J-K», в седьмой – значения торсионного угла «I-J-K-L», в 8 столбец – атомные

массы. В последнем девятом столбце можно задать цвета атомов (для отображения 3D-модели молекулы).

В нижней таблице рисунка 3 приведены характеристики каждого сорта атома. Первые шесть атомов (нумерация в 5-ом столбце) углерода находятся в sp^2 -гибридизованном состоянии; атомы «7» и «8» – в sp^3 -гибридизованном состоянии углерода; «9» – атом кислорода; «10» – «19» – атомы водорода. В другие столбцы (1-4) вводятся параметры ААП для каждого сорта атомов.

На панели ввода данных для расчёта термодинамических характеристик расположены параметры, разъяснение которых представлено в таблице 2.

Таблица 2. Физический смысл параметров

Параметр	Физический смысл
NT	Число узлов и весов
NP	
D	Параметр решётки адсорбента
R	Длина интервала поиска минимума потенциальной функции
P	Число шагов поиска минимума потенциальной функции
ST	Числа симметрии
SPS	
T1	Начальное значение температуры
T2	Шаг температуры
T3	Конечное значение температуры

После задания входных данных можно проводить расчёты. В системе предусмотрено два вида расчётов: расчёт ТХА заданной молекулы (рис. 4) и её пространственного расположения (рис. 5). Все результаты представляются в виде таблиц на соответствующих вкладках интерфейса. Кроме того, результаты расчётов можно сохранить в файлах формата *.xls или экспортировать их в табличный процессор MS Excel для последующей обработки.

На рис. 4 в верхней таблице представлены результаты расчёта ТХА для каждого значения температуры с заданным шагом. В нижней таблице приведены значения потенциальной функции, т. е. исходные данные для определения ТХА.

Результаты расчётов пространственного расположения молекулы удобно представлять в графическом виде (рис. 6). Поэтому в системе предусмотрена возможность трёхмерного отображения – вывод 3D-модели

	Конфигурационный интеграл(l=2)	Конфигурационный интеграл(l=3)	Константа Генри	Константа Генри(K1)	Изостерическая теплота адсорбции
1	-0.310335874250335	7.54897404408967	7.23368658900928	10.1626378288729	15.02941402
2	-0.36065321941747	7.3915506823483	3.65198851509367	6.73509043478456	14.84851888
3	-0.414969222421221	7.30680081920646	1.00024405051917	4.21687736283459	14.64483742
4	-0.47361227561986	7.26970423976317	-1.03198408433435	2.30243226363745	14.41572360
5	-0.536944625066922	7.26558859021561	-2.63071703098192	0.809059832647712	14.16155679

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-11.6459675559055	-11.6410327526366	-11.632657426854	-11.6218303698415	-11.6101954596296	-11.60010011075				
2	-11.4489353094358	-11.4220549659558	-11.376712494589	-11.318799444945	-11.2579114410671	-11.20724509069				
3	-11.0399744941373	-10.9726331954262	-10.8608304717428	-10.7220303999974	-10.5826552637888	-10.47544082644				
4	-10.4038638294685	-10.2830282024771	-10.0879199697117	-9.85706450560712	-9.64211091715502	-9.496718463211				
5	-9.63670072884408	-9.46074693774868	-9.18658012446657	-8.88187453147778	-8.62669161763812	-8.488214180918				
6	-8.92424894535931	-8.69805044767369	-8.35766219512668	-8.003447893595	-7.74367497552737	-7.652863979677				
7	-8.43776948697648	-8.16357872422182	-7.76134614523114	-7.36565659169796	-7.11483794954328	-7.091196228235				
8	-8.26666081000796	-7.94541073461984	-7.47678503128182	-7.03071140472388	-6.78211630034357	-6.823373919203				
9	-8.38758794801707	-8.04090302674535	-7.51558307899297	-7.00856384429041	-6.74420643584828	-6.820331614671				
10	-8.58703642040422	-8.29877984800379	-7.79580729413409	-7.25142043498919	-6.9522733421775	-6.982536974634				

Рис. 4. Термодинамические характеристики адсорбции молекулы 2-фенилэтанола

Расчёт термодинамических характеристик адсорбции			
Файл Редактирование Рассчитать 3D-модель Справка			
Входные данные Декартовы координаты Термодинамические хар-ки Информация о молекуле			
№ атома	Координата X	Координата Y	Координата Z
1	0,947831965336139	-1,34293061743175	0,196768881792328
2	2,22750056129164	-0,802566451235401	0,371282068733041
3	2,45699751495774	0,552941898849945	0,106842546144444
4	1,40682587266833	1,36808608273894	-0,332110163394866
5	0,127157276712834	0,827721916542591	-0,506623350325578
6	-0,102339676953264	-0,527786433542754	-0,242183827736982
7	-1,49169415256209	-1,11446752827022	-0,431655287844041
8	-2,54874389332518	-0,0251594568346953	-0,171551902517932
9	-2,04372584132969	0,910433849413027	0,78475449841387
10	0,770791458222294	-2,38860848749759	0,400765084932103
11	3,03763297105775	-1,4313919645212	0,709902730369937
12	3,44417043183769	0,969794255629986	0,241467004641565
13	1,58386637978218	2,41376395280478	-0,536106366524641
14	-0,682975133053276	1,45654742982839	-0,845244011962474
15	-1,6374534213606	-1,93682079722512	0,268765540371762
16	-1,59406586929727	-1,48382554271273	-1,45204476680773
17	-3,45751315195999	-0,485844025555964	0,21575636996298
18	-2,77308188542637	0,493375931065645	-1,10369648185906
19	-2,2787438496317	0,621869611351057	1,66968230128

Рис. 5. Декартовы координаты атомов молекулы

молекулы. В режиме отображения молекулы доступны опции: центрирование молекулы – разворот молекулы; отображение нумерации атомов молекулы; отображение осей координат; произвольное вращение молекулы в пространстве; изменение масштаба. Это даёт возможность проверить правильность ввода

исходных геометрических параметров молекулы.

Результаты расчёта и их обсуждение.

По экспериментальным данным работы [9] в газовой фазе молекула этилбензола стабилизируется в антиконформации, с углом $t_1 = 90^\circ$. В силовом поле ГТС она может переходить

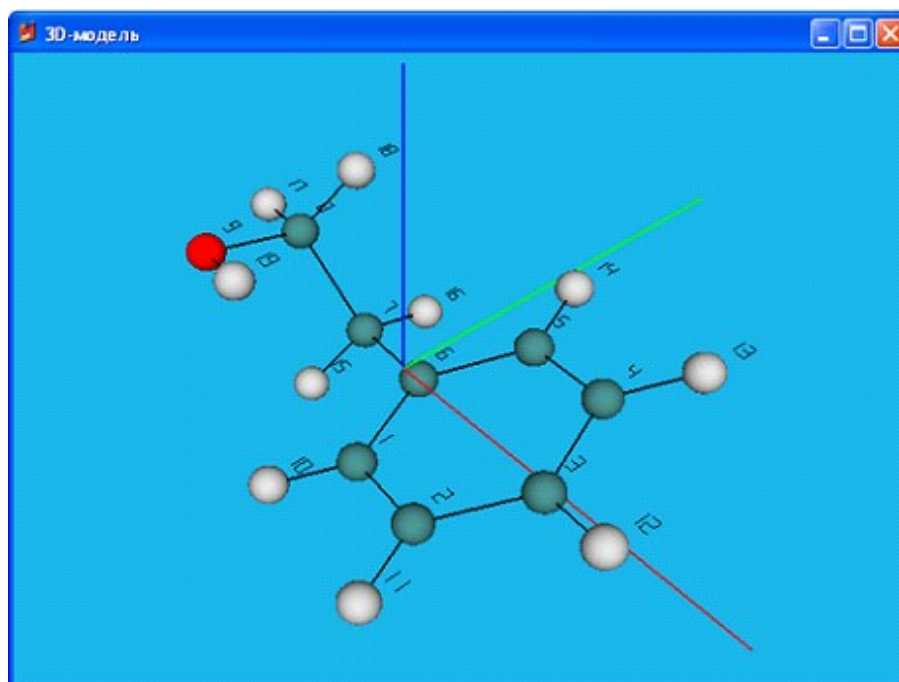


Рис. 6. Графическое отображение молекулы 2-фенилэтанола (3D-модель)

из стабильной неплоской конформации в плоскую и обратно. Из работы [10] известно, что этилбензол при адсорбции на ГТС рассматривается как смесь конформационных изомеров. В таблице 3 приведены значения константы Генри для молекулы этилбензола при адсорбции на ГТС в интервале температур 300...500 К.

Из таблицы видно, что литературные значения константы Генри попадают в диапазон рассчитанных значений для крайних

торсионных углов молекулы, что подтверждает правильность проведённых расчётов. Кроме того, экспериментальные данные работы [5] и расчётные значения для неплоской конформации молекулы с углом внутреннего вращения $t_1=30^\circ$ имеют удовлетворительное совпадение (рис. 7). В условиях хроматографического эксперимента константы Генри, рассчитанные для значения торсионного угла $t_1=30^\circ$, наилучшим образом совпадают с экспериментом [11].

Таблица 3. Значения $\ln K_1$ (мкМ) для молекулы этилбензола при адсорбции на ГТС в интервале температур 300...500 К

	Этилбензол $C_6H_5-CH_2-CH_3$		
	торсионный угол 0°	торсионный угол 90°	литературные данные [5]
T, K	$\ln K_1, \text{мкМ}$	$\ln K_1, \text{мкМ}$	$\ln K_1, \text{мкМ}$
300	8.53	7.01	7.26
350	5.40	4.13	4.52
400	3.10	2.03	2.47
450	1.35	0.44	0.87
500	-0.01	-0.79	-0.41

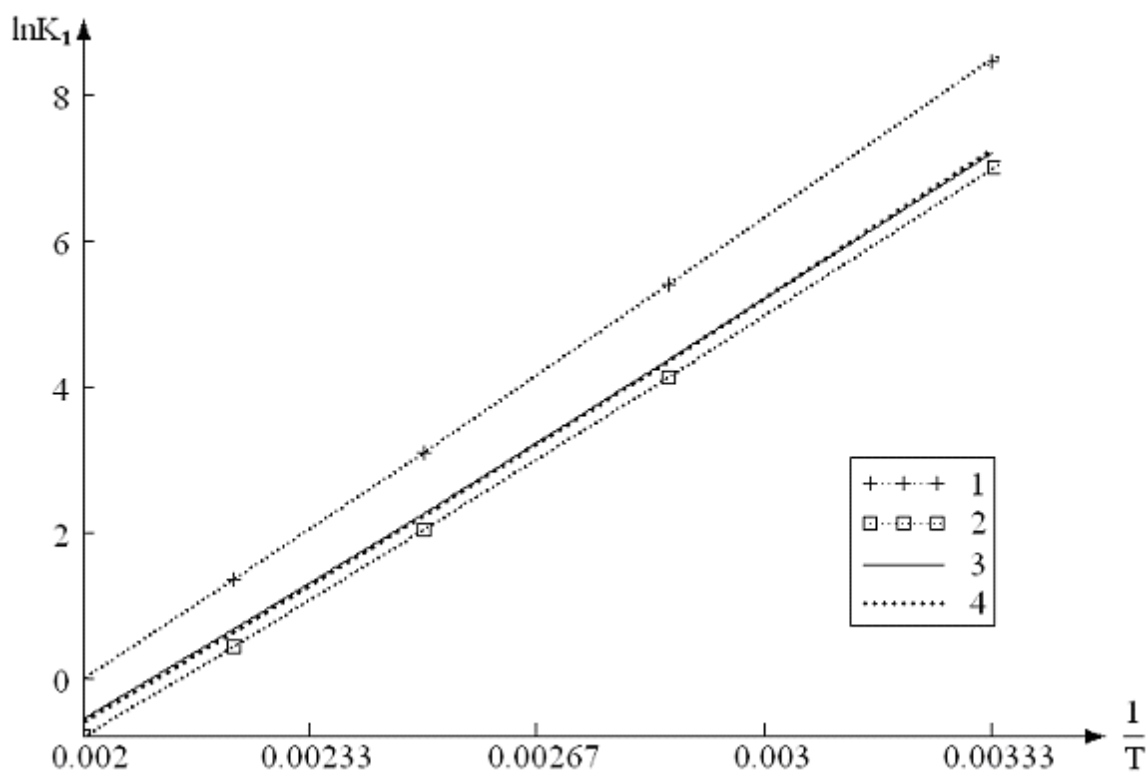


Рис. 7. Сравнительная диаграмма расчётных (1 – при $t_1=0^\circ$, 3 – при $t_1=90^\circ$, 4 – при $t_1=30^\circ$) и экспериментальных (2) значений константы Генри для молекулы этилбензола

Молекула этилбензола на поверхности ГТС в плоской (А) и неплоской (Б) конформациях изображена на рис. 8.

В работах [12, 13] установлено, что для молекулы 2-фенилэтанола энергетически наиболее выгоден конформер с внутримолекулярной водородной связью. Сохраняется ли такое внутримолекулярное взаимодействие при адсорбции на ГТС, может быть выяснено путём варьирования геометрии и сопоставления рассчитанных теплот адсорбции и энергии внутримолекулярной водородной связи. Полученные значения ТХА для разных конформаций молекулы в диапазоне темпе-

ратур 300-500 К позволили установить наличие внутримолекулярной водородной связи у 2-фенилэтанола в силовом поле ГТС.

Наиболее наглядно результаты варьирования торсионных углов t_1 и t_2 молекулы 2-фенилэтанола можно представить в виде трехмерной диаграммы (рис. 9). Сравнивая такие диаграммы для различных молекул, в том числе изомерных, можно предсказать порядок их выхода из колонны с ГТС и, соответственно, идентифицировать молекулы.

При использовании автоматизированной системы расчёта для построения многомерных диаграмм требуется всего несколько

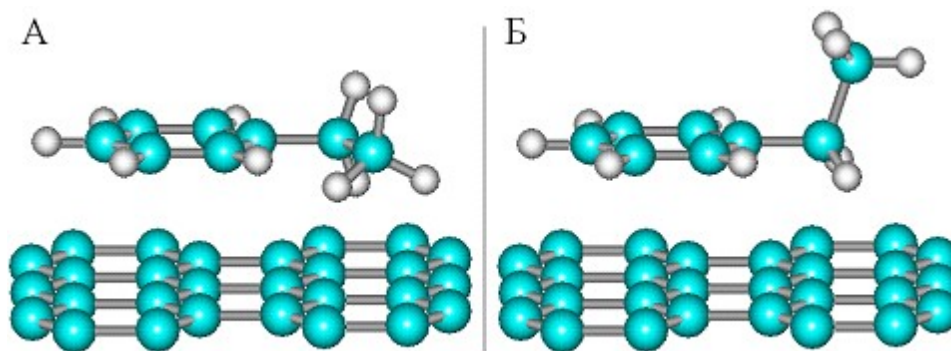


Рис. 8. Молекула этилбензола на поверхности ГТС: плоская (А) и неплоская (Б) (с углом внутреннего вращения 90°) конформации

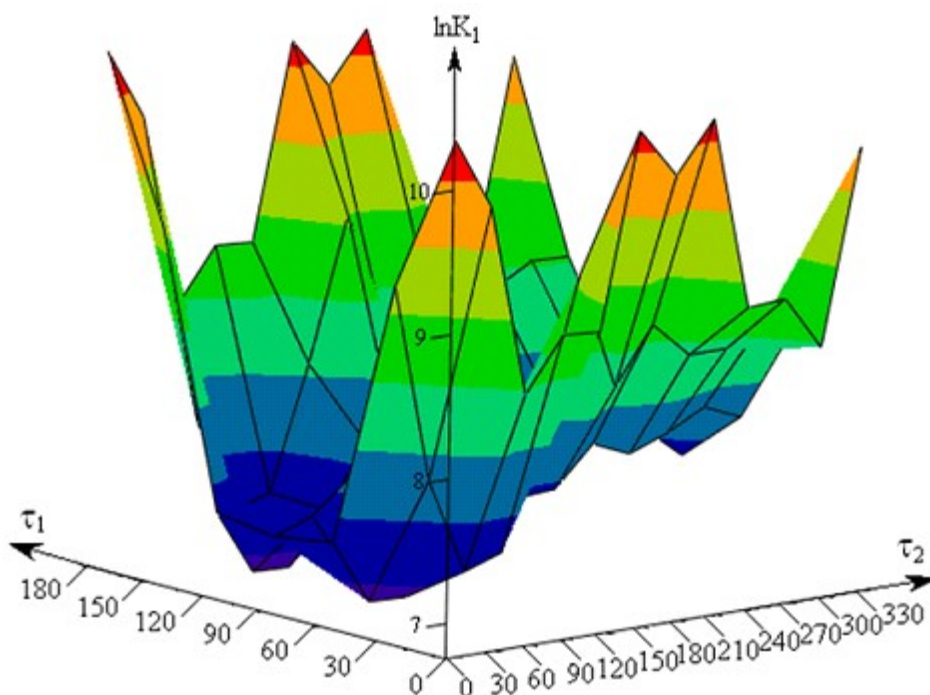


Рис. 9. Трёхмерная диаграмма зависимости $\ln K_1$ от торсионных углов t_1 и t_2 при $t_3=0^\circ$ для молекулы 2-фенилэтанола при адсорбции на ГТС (при $T=300$ К)

минут. Это позволяет идентифицировать отдельные изомеры в их сложных смесях и прогнозировать порядок выхода веществ из хроматографической колонки на основе величин удерживания.

Заключение. Приведённые примеры не охватывают все имеющиеся и доступные в перспективе возможности автоматизированной системы расчёта. Расширенный вариант программы будет содержать графический модуль, позволяющий визуализировать геометрию молекулы в адсорбированном состоянии после варьирования всех углов внутреннего вращения. Такая визуализация будет доступна для любого конформационного состояния молекулы. В дальнейшем при использовании программы для интерпретации экспериментальных данных и предсказаний величин удерживания изомерных молекул будет поддерживаться автоматизированное построение многомерных диаграмм (углы внутреннего вращения – ТХА) и их сравнение для изомеров разных классов, практически важных в химии ракетных и реактивных топлив.

Библиографический список

1. Аfreyмович, А. Я. Молекулярно-статистический расчёт адсорбции углеводородов на графите [Текст] : дисс. канд. хим. наук. – М.: МГУ, 1972.

2. Варфоломеева, В. В. Обеспечение экологической безопасности при использовании гидразинных горючих в ракетно-космической отрасли [Текст] / В. В. Варфоломеева, А. В. Терентьев, А. В. Ульянов, А. К. Буряк // Труды XI Всероссийского конгресса «Проблемы выживания человека в техногенной среде современных городов». - Самара, 2006. - С. 57-60.

3. Буряк, А. К. Сочетание масс-спектрометрического и молекулярно-статистического методов для идентификации изомеров [Текст] // Изв. АН СССР. Сер. Химическая. - 1990. - № 9. - С. 1995-2000.

4. Буряк, А. К. Применение молекулярно-статистических расчётов для предсказания хроматографического разделения изомерных дифтордифенилов [Текст] / А. К. Буряк,

А. В. Ульянов // Изв. академии наук. Сер. Химическая. - 1996. - №3. - С. 623 - 626.

5. Авгуль, Н. Н. Адсорбция газов и паров на однородных поверхностях [Текст] / Н. Н. Авгуль, А. В. Киселев, Д. П. Пошкус. - М.: Химия, 1975.

6. Киселев, А. В. Межмолекулярные взаимодействия в адсорбции и хроматографии [Текст] – М.: Высшая школа, 1986.

7. Киселев, А. В. Молекулярные основы адсорбционной хроматографии [Текст] / А. В. Киселев, Д. П. Пошкус, Я. И. Яшин. - М.: Химия, 1986.

8. Буряк, А. К. Применение молекулярно-статистических методов расчёта термодинамических характеристик адсорбции при хромато-масс-спектрометрической идентификации органических соединений [Текст] // Успехи химии. - 2002. - Т. 71. - № 8. - С. 788.

9. Sun S., Bernstein E. R. Spectroscopy of neurotransmitters and their clusters. 1. Evidence for five molecular conformers of phenylamine in a supersonic jet expansion [Текст] // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. P. 5086.

10. Грумадас, А. Ю. Определение потенциальной функции внутреннего вращения молекул из газо-хроматографических данных [Текст] : автореферат дисс. канд. хим. наук. - М.: МГУ, 1983.

11. Kalashnikova E. V, Kiselev A. V., Petrova R. S., Shcherbakova K. D., Poshkus D. P. Chromatographic measurements and molecular statistical calculations of thermodynamic characteristics of adsorption of aromatic and polycyclic hydrocarbons on graphitized thermal carbon black [Текст] // Chromatographia. 1979. V. 12. N 12. P. 799.

12. Brown R. D., Godfrey P. D. Detection of a higher energy conformer of 2-phenylethanol by millimeter-wave spectroscopy // J. Phys. Chem. A. 2000. V. 104. P. 5742.

13. Dickinson J. A., Hockridge M. R., Kroemer R. T. et al. Conformational choice, hydrogen bonding, and rotation of the $S_1 \text{ } ^1S_2$ electronic transition moment in 2-phenylethyl alcohol, 2-phenylethylamine, and their water clusters [Текст] // J. Am. Chem. Soc. 1998. V. 120. P. 2622.

References

1. Aphreimovitch, A. Ya. Molecular-statistical calculation of hydrocarbon adsorption on graphite. Diss. cand. chem. science. – Moscow: Moscow State University – 1972.
2. Varfolomeyeva, V. V. Provision of ecological safety when using hydrazine fuels in space rocketry. / V. V. Varfolomeyeva, A. V. Terentyev, A. V. Ulyanov, A. K. Buryak // Transaction of the XI All-Russian Congress “Problems of man’s survival in the technogenous environment of modern cities” – Samara, 2006. – pp. 57-60.
3. Buryak, A. K. Combination of mass-spectrometric and molecular-statistical methods for isomer identification. // Izvestia (News) of USSR Academy of Sciences. Chemistry series. – 1990. No. 9 – pp. 1995-2000.
4. Buryak, A. K. Application of molecular – statistical calculation for the prediction of chromatographic separation of isomeric difluorinatediphenyls. / A. K. Buryak, A. V. Ulyanov // Izvestia (News) of Academy of Sciences. Chemistry series. – 1996. – No. 3. – pp. 623-626.
5. Avgul, N. N. Adsorption of gas and steam on homogeneous surfaces / N. N. Avgul, A. V. Kiselyov, D. P. Poshkus. – Moscow: Khimiya (Chemistry), 1975.
6. Kiselyov, A. V. Intermolecular interactions in adsorption and chromatography – Moscow: Vysshaya Shkola (Higher School), 1986.
7. Kiselyov, A. V. Molecular foundations of adsorption chromatography / A. V. Kiselyov, D. P. Poshkus, Ya. I. Yashin. – Moscow: Khimiya (Chemistry), 1986.
8. Buryak, A. K. Application of molecular-statistical methods of calculating thermodynamic characteristics of adsorption in chromatomass-spectrometric identification of organic compounds // Uspekhi khimii (Advances in chemistry) – 2002. – Vol. 71 – No. 8. p. 788.
9. Sun S., Bernstein E.R. Spectroscopy of neurotransmitters and their clusters. 1. Evidence for five molecular conformers of phenylamine in a supersonic jet expansion // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. P. 5086.
10. Grumadas, A. Yu. Determination of the potential function of molecules’ internal rotation on the basis of gasochromatographic data: abstract of diss. cand. chem. science. Moscow: Moscow State University. – 1983.
11. Kalashnikova E.V, Kiselev A.V., Petrova R.S., Shcherbakova K.D., Poshkus D.P. Chromatographic measurements and molecular statistical calculations of thermodynamic characteristics of adsorption of aromatic and polycyclic hydrocarbons on graphitized thermal carbon black [Текст] // Chromatographia. 1979. V. 12. N 12. P. 799.
12. Brown R.D., Godfrey P.D. Detection of a higher energy conformer of 2-phenylethanol by millimeter-wave spectroscopy // J. Phys. Chem. A. 2000. V. 104. P. 5742.
13. Dickinson J.A., Hockridge M.R., Kroemer R.T. et al. Conformational choice, hydrogen bonding, and rotation of the S1<S2 electronic transition moment in 2-phenylethyl alcohol, 2-phenylethylamine, and their water clusters [Текст] // J. Am. Chem. Soc. 1998. V. 120. P. 2622.

COMPUTER-AIDED-DESIGN SYSTEM FOR CALCULATING ADSORPTION THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS

© 2008 L. S. Zelenko¹, V. V. Varfolomeyeva¹, V. Yu. Kuznetsov¹,
A. V. Fed’kayev¹, A. V. Terentyev¹, A. K. Buryak²

¹Samara State Aerospace University

²Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Science, Moscow

A CAD system for calculating adsorption thermodynamic characteristics has been developed which makes it possible to simulate the process of physical adsorption for molecules of various classes of organic compounds on the surface of graphitized thermal black. The system makes it possible to perform calculations for molecules capable of internal rotation, for all possible conformations. A three-dimensional model has been constructed which makes it possible to check whether the input of the molecule’s initial geometric parameters is correct. It also allows exporting the data obtained to the table processor MS EXCEL for their further treatment. The system’s capabilities are shown with practically important molecules as compared to experimental data.

Thermodynamic characteristics, Henri’s constant, adsorption heat, adsorption, graphitized thermal black, atom-atom potentials, experiment, molecular-statistical calculation method, simulation, CAD system

Информация об авторах

Зеленко Лариса Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры программных систем. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: разработка сложных программных систем, в том числе автоматизированных систем обработки информации и управления, автоматизированных системонаучных исследований, технологии программирования и проектирования, информационные технологии.

Варфоломеева Вера Васильевна, кандидат химических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: теория химического строения и химической связи, водородные связи, поверхностные явления, адсорбция, кинетика и механизмы реакций.

Кузнецов Владислав Юрьевич, студент. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева.

Федькаев Алексей Валерьевич, студент. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева.

Терентьев Алексей Владимирович, ассистент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: теория химического строения и химической связи, водородные связи, поверхностные явления, адсорбция.

Буряк Алексей Константинович, доктор химических наук, заведующий лабораторией физико-химических основ хроматографии и хромато-масс-спектрометрии. Институт физической химии и электрохимии имени А.Н.Фрумкина РАН. Область научных интересов: хроматография, хромато-масс-спектрометрия, поверхностные явления, адсорбция.

Zelenko, Larisa Sergeevna, candidate of technical science, associate professor, department of software systems Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. Area of research: elaboration of complex software systems including CAD systems of processing information and control, CAD system scientific investigations, technologies of programming and design, information technologies.

Varfolomeyeva, Vera Vasiliyevna, candidate of chemical science, associate professor, department of ecology and vital activity safety Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. Area of research: theory of chemical structure and chemical bonds, hydrogen bonds, surface phenomena, adsorption, kinetics and mechanisms of reactions.

Kuznetsov, Vladislav Yurievitch, studen. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov.

Fed'kayev, Alexey Valerievitch., student. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov.

Terentiev, Alexey Vladimirovitch, assistant, department of ecology and vital activity safety Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. Area of research: theory of chemical structure and chemical bonds, hydrogen bonds, surface phenomena, adsorption.

Buruak, Alexey Konstantinovich, doctor of chemical science, head of laboratory of physico-chemical foundations of chromatography and chromato-mass-spectrometry. Institute of physical chemistry and electrochemistry named after A. N. Frumkin, Russian Academy of Science. Area of research: chromatography, chromato-mass-spectrometry, surface phenomena, adsorption.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

© 2008 А. Н. Коптев¹, Д. С. Ергалиев², К. Ж. Саханов²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Военный институт Сил воздушной обороны министерства обороны Республики Казахстан

Рассматривается модель формирования набора измеряемого множества параметров для оценки технического состояния бортового комплекса оборудования (БКО) воздушного судна в рамках диагностической системы управления, представляемой сетью, в которую введены образующие как базовые образы. Предложены набор аксиом для формирования на базе вектора признаков оценки состояния образующих, представляющих диагностируемую систему БКО, и архитектура системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания в виде сети, функционирование которой связано с введённой системой аксиом.

Модель, диагностируемый объект, множество, образующая, образ, конфигурация, сеть, система, диагностическое управление, вектор, признак, пространство, техническое обслуживание

Рассмотрим подход к моделированию систем диагностического управления состоянием сложных систем бортового комплекса на базе методов теории распознавания образов [1].

Пусть задана некоторая конфигурация образующих G^a из множества образующих G :

$$C = (g_1; g_2; \dots; g_m), c \in b(\mathfrak{X}), \quad (1)$$

регулярная в смысле $b(\mathfrak{X})$. Тогда, чтобы произвести оценку её состояния, необходимо измерять параметры образующих в среде БКО, т. е. информацию, характеризующую конфигурацию для $p \in P$.

Необходимо произвести предварительную обработку этой информации, а затем передать её в сеть N - диагностическую систему управления (процессор отображения), которая в состоянии изменять сама себя для того, чтобы сравнивать базовые образы, принятые в среде БКО, с полученными в результате взаимодействия конфигураций среды БКО. Это достигается при помощи изменения коэффициентов связи N , т. е. модификации процессора изображений, который представляет собой N . Осуществляемый в результате вывода образ относится к индуктивно-

му типу. С помощью наблюдения, происходящего в среде, сеть N будет в состоянии всё в большей и большей степени понимать окружающую структуру образов [2].

Рассмотрим конфигурацию, в которой $c = \{g\}$ состоит из единственной образующей g . Вектор её признаков состоит из подвекторов $a(g)$. Вектор $a(g)$ представлен в виде сенсорного вектора $u(t)$, элементы которого принадлежат сенсорному пространству U .

В носителе информации применено импульсное кодирование с частотной модуляцией. Будем считать, что действительная частота повторения импульсов отличается от u_{sp} самопроизвольной частоты повторения импульсов на положительную или отрицательную величину в зависимости от истинных значений в векторе признаков. Форма импульса будет фиксирована и точно задана на временной шкале ожидаемых междуимпульсных интервалов.

Для признака каждого типа v на A_v будет задана некоторая алгебра множества a^v , индуцирующая на A алгебру-произведение:

$$a = a^1 \times a^2 \times a^3 \times \dots \quad (2)$$

Алгебра множеств имеет следующую интерпретацию: она показывает, насколько подробна информация, содержащаяся в сен-

сорном входном сигнале. Если смысл очень информативен, т. е. P располагает мощной аппаратурой, то алгебра множеств является точной в техническом смысле слова, и наоборот.

Среди множеств, принадлежащих алгебре a^v , выделим непустые множества, не содержащие собственных подмножеств. Естественно, что число подобных множеств конечно: $j_1^v j_2^v j_3^v \dots$

Множество A^v в целом представляет собой объединение всех множеств j_j^v , поскольку в противном случае

$$k = A^v \mathbf{I} (j_1^v \mathbf{U} j_2^v \mathbf{U} j_3^v \dots) \neq \emptyset, \quad (3)$$

где A^v - измеримое множество k не может, однако, не допускать разбиения на меньшие a^v - измеримые множества, так как в этом случае оно оказалось бы равным некоторому множеству j_i^v , что противоречит (3). С другой стороны, его нельзя представить в виде объединения $j_{i_1}^v \mathbf{U} j_{i_2}^v \mathbf{U} \dots$, поскольку в этом случае

$$k = j_{i_1}^v \mathbf{U} j_{i_2}^v \mathbf{U} \dots (\mathbf{I} (j_{i_1}^v)^c \mathbf{I} (j_{i_2}^v)^c \dots) \neq \emptyset. \quad (4)$$

Следовательно, $k = j$, и поэтому

$$A^v = j_1^v \mathbf{U} j_2^v \mathbf{U} j_3^v \dots \quad (5)$$

Тогда для любого a^v - измеримого множества F , принадлежащего A^v , получаем

$$F = (A^v \mathbf{I} F) = (F \mathbf{I} j_1^v) \mathbf{I} (F \mathbf{I} j_2^v) \mathbf{I} \dots \quad (6)$$

В правой части выражения (6) имеет место либо $j_i^v \subseteq F$, либо $j_i^v \mathbf{I} F = j$, поскольку множества j_i^v не поддаются разбиению. Это означает, что члены, входящие в объединение, либо равны некоторому множеству j_i^v , либо представляют собой пустые множества.

Первая аксиома о диагностируемых объектах сформулирована в виде условия измеримости относительно алгебр множеств a^v .

Аксиома 1. Сенсорное пространство U представляет собой прямое произведение признаков сенсорных подпространств U_1, U_2, \dots :

$$U = U_1 \times U_2 \times U_3 \times \dots, \quad (7)$$

и компоненты вектора $u(g)$ в подпространстве U^v определяются следующим образом:

$$u_i^v(g) = u_0 \cdot \# \{ f_i^v(g) = \dots \} \quad (8)$$

при $f_i^v \in j_j^v$,

где u_0 - случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией V ; для всех v величина u_0 одна и та же. Носителем u_0 является вся ось действительных чисел, и в нуле дискретной вероятности не имеется.

Всё это относится к отдельной образующей. Обратимся к некоторой регулярной конфигурации

$$C = (g_1; g_2; \dots; g_n) \in b_n(\mathfrak{R}).$$

Описанная кодировка $u = u(g)$ даёт некоторый сенсорный вектор u , действующий на сеть N в течение определенного периода времени. Сначала g_1 представляется в виде $u(g_1)$ и подаётся в течение некоторого времени на сеть N , затем g_2 представляется в виде $u(g_2)$ и подаётся на N и т. д. В дополнение к подобному кодированию будем допускать быстрое сканирование конфигурации, когда P пытается изучать конфигурацию как единое целое. Это означает, что конфигурация, у которой $n > 1$, предстаёт перед специалистом как последовательность параметров P . Вектор u как функция времени будет в таком случае некоторой периодической функцией, например с периодом. Поэтому

$$\begin{aligned} u &= u(g_1) \text{ в течение времени } Dt_1, \\ u &= u(g_2) \text{ в течение времени } Dt_2, \\ &\dots \\ u &= u(g_n) \text{ в течение времени } Dt_n, \\ t &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n, \end{aligned} \quad (9)$$

а затем следуют периодические повторения. Скорость сканирования по конфигурации ограничена лишь инерционностью приборов,

которыми располагает $P: Dt_1 \rangle t_{scan}$. Максимальная длина кадра не ограничена. Во всех представлениях $u(g_1)$, $u(g_2)$ будет использоваться одно значение u_0 , т. е. для конфигурации в целом кодирование когерентно. Отношения Dt_r / Dt характеризуют внимание, уделяемое P образующим, из которых состоит наблюдаемая конфигурация объектов. Они представляют собой неотрицательные числа, прибавляемые к 1.

Аксиома 2. 1) Конфигурация, принадлежащая $b(\mathfrak{X})$, представляется некоторой периодической кусочно-постоянной функцией времени, принимающей значения $u(g_1)$, $u(g_2)$ и т. д., причём кодирование когерентно.

2) Различные конфигурации представляются указанным способом, но с использованием статистически независимых значений u_0 .

Аксиома 3. 1) Под диагностируемым объектом будем понимать линейный оператор L , получаемый как некоторая линейная функция проекционных операторов P_j^v :

$$L = \sum_{vj} I_j^v P_j^v, \quad (10)$$

где I_j^v - действительные постоянные; P_j^v - оператор проекции, который в U проектирует на j -е измерение j_j^v v -го сенсорного подпространства. Аналогично P^v должен проектировать на v -е сенсорное подпространство.

2) Под диагностическим высказыванием будем понимать диагностируемый объект, представляющий собой некоторую проекцию.

Рассмотрим некоторую конфигурацию $c = \{g\}$ с одной образующей, переведённую в представление $u(g)$ за время, в течение которого c наблюдалась. Повторим это наблюдение, воспроизведя конфигурацию несколько раз, т. е. воспользовавшись различными независимыми значениями u_0 (аксиома 1).

В частном случае, когда оператор L обращается в некоторую проекцию P_j^v , эта величина принимает следующий вид:

$$V \left[\# \left\{ f_i^v(g) = \begin{matrix} \text{Э} \\ \text{Н} \\ \text{О} \\ \text{Э} \\ \text{А} \end{matrix}, f_i^v \in j_j^v \right\} \right]^2, \quad (11)$$

так что известные значения математического ожидания будут определять значения в квадратных скобках в (11), поскольку V - это известная постоянная. Следовательно, две образующие g и g' можно различить (теоретически), если

$$\# \left\{ f_i^v(g) = \begin{matrix} \text{Э} \\ \text{Н} \\ \text{О} \\ \text{Э} \\ \text{А} \end{matrix}, f_i^v \in j_j^v \right\} \neq \# \left\{ f_i^v(g') = \begin{matrix} \text{Э} \\ \text{Н} \\ \text{О} \\ \text{Э} \\ \text{А} \end{matrix}, f_i^v \in j_j^v \right\} \quad (12)$$

по крайней мере, для некоторых пар (v, j) .

Отображение

$$g \rightarrow (E \| P_j^v u(g) \|^2; j = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

представляет G в виде векторов, компонентами которых являются целые неотрицательные кратные V значения. В случае, когда a состоит из всех подмножеств A , значение этого отображения определяет значение истинности каждого бинарного признака, так что образующая g определяется однозначно. Если a более ограничена, что соответствует менее мощному приборному оснащению Ω , то отдельные образующие не всегда можно отличить друг от друга.

Выше была введена статическая среда, в которой действует Ω , и тем самым на сенсорном пространстве U было задано некоторое распределение вероятностей. Рассмотрим однообразующие конфигурации. Из (13) следует, что математическое ожидание сенсорного вектора равно нулю:

$$E[u(g)] = \int_G u(g) Q_1(dg) = 0. \quad (14)$$

Введём ковариации

$$\tilde{A} = E[u(g)u^T(g)] = \int_G u(g)u^T(g) Q_1(dg). \quad (15)$$

В частном случае счётной среды, когда в $\text{exp}(P)$ могут входить лишь определённые объекты g_1, g_2, \dots , характеризующиеся вероятностями $Q_1(g_1), Q_2(g_2), \dots$, получаем

$$\tilde{A} = \sum_m u(g_m)u^T(g_m) Q_1(g_m). \quad (16)$$

Ковариации включают большую часть, но не все существенные факты о $\exp(P)$. Величину Γ будем называть оператором опыта.

Важное следствие предложения (16) заключается в том, что можно ожидать взаимной (почти) ортогональности $u(g)$. Таким образом, собственные векторы оператора опыта представляют собой (почти) сенсорные векторы существенно разных объектов. Их собственные значения равны

$$Q_1(g_m) \|u(g_m)\|^2 = Q_1(g_m) \text{ энергия } [u(g_m)]. \quad (17)$$

Введём ядро в сенсорном пространстве U оператора опыта Γ

$$A(\tilde{A}) = \{u | \tilde{A}u = 0\} \subset U, \quad (18)$$

которым будет удобно пользоваться при описании характеристик обучения.

Ядро $A(\Gamma)$ для счётной среды с одноатомными конфигурациями представляет собой ортогональное дополнение линейного замыкания $Lin\{u(\exp(\Omega))\}$.

Доказательство. Произвольный сенсорный вектор u можно записать как

$$u = \sum_{g_k \in \exp(W)} e_k u(g_k) + u'' = u' + u''; u'' \perp Lin\{u(\exp(W))\}. \quad (19)$$

Поскольку оператор Γ , определяемый выражением (19), обладает тем свойством, что $\Gamma u'' = 0$, то для того, чтобы обеспечить и $u \perp A(\Gamma)$, $\Gamma u = 0$, необходимо и достаточно выполнения условий: $\Gamma u' = 0$. Оператор Γ , однако, является симметрическим, и его сужение на линейное замыкание Lin несингулярно. Действительно, если u - линейное замыкание $u(\exp(\Omega))$ и $\Gamma u = 0$, то из (17), (18) следует, что

$$u^T \tilde{A}u = \sum_m (u^T u(g_m))^2 Q_1(g_m) = 0. \quad (20)$$

Поэтому $u \perp u(g_m)$ для всех μ , поскольку $Q_1(g_m) > 0$ для всех μ , так как ограничили носителям $\exp(\Omega)$ от Q_1 . Следовательно, $u \in A(\tilde{A})$ тогда и только тогда, когда $u' = 0$, и

поэтому u'' принадлежит ортогональному дополнению линейного замыкания.

Отображение u отображает $\exp(P)$, но не всегда на Lin . Отметим, что множество $u(\exp(P))$ можно сделать линейно замкнутым, введя в $\exp(P)$ следующие фиктивные объекты, обладающие неисправностями различных видов, т. е. деформированные объекты. Если g_1 и $g_2 \in \exp(P)$, то, естественно,

$$u = c_1 u(g_1) + c_2 u(g_2) \in Lin,$$

но при этом не должно быть объекта g такого, что $u = u(g)$. Подбирая соответствующие значения u_0 , можно добиться того, чтобы u был суммой, которая соответствует образующим, когда числа, входящие в правую часть (20), являются натуральными числами. Следовательно, признак определяется на a и задан новый «объект».

Считается, что эти фиктивные объекты оказывают существенное влияние на характеристики обучения Ω . Отметим, что при построении фиктивных объектов используются различные значения u_0 , т. е. действует условие некогерентности.

Аддитивный шум, налагаемый на вектор u , не вызывает сколько-нибудь существенных изменений. Поэтому вводится специальная аксиома.

Аксиома 4. Кодированное представление переменной входной величины определяется как

$$u(t) = \int_{-\infty}^t w(t-s) u_s(s) ds, \quad (21)$$

где $u_c(s)$ представляет величину, определяемую выражением (21) в любой момент времени s ; w -весовая функция.

Временное суммирование в (21), представляющее периферийную обработку, выражается с помощью временной весовой функции w , соответствующей постоянной времени t_c . Её необходимо учитывать только в тех случаях, когда предъявляемые образующие быстро сменяют друг друга. Единственное допущение, необходимое для $w(t)$, заключается в том, что $w(t) = O(t^{-2})$, $t > 1$.

Кодирование, определяемое (21), не обладает мощностью, достаточной для передачи всей информации, необходимой P для изучения $\text{env}(P)$. Отказавшись на время от u_0 в (21), положив $u_0 = 1$, решаем данную проблему при помощи уплотнения (мультиплексирования) сенсорного вектора и введения входного поля у сети. Для этого потребуются следующая аксиома.

Аксиома 5. Для заданного сенсорного вектора $u = u(g)$ сформируем уплотнённый вариант (порядок уплотнения, или кратность m)

$$u = u \otimes u \otimes \dots \otimes u \quad (m \text{ раз}), \quad (22)$$

где u принимает значения в пространстве входных сигналов

$$Y = U \otimes U \otimes \dots \otimes U. \quad (23)$$

Вновь вводим коэффициент когерентности u_0 . Для этого u заменяется на $u_0 u$. В данном случае u_0 обладает теми же, что и прежде, свойствами.

Оператор уплотнения \otimes имеет следующий смысл. Если задан некоторый вектор $u = (u_i)$, то его уплотнённым с кратностью m вариантом является m -мерный массив с элементами $u_{i_1}, u_{i_2}, \dots, u_{i_m}$ - результат перемножения компонент. Кратность m отнюдь не столь велика, как исходные размерности U и U^v .

Для простоты будем предполагать, что во всей системе порядок уплотнения один и тот же. В качестве обобщения этого случая можно рассмотреть ситуацию, когда кратность изменяется в системе от 1 до некоторого максимума. Если, в частности, информационный носитель системы обладает высокой избыточностью, то целесообразно уплотнять лишь некоторую часть каждого сенсорного подпространства.

Рисунок 1 даёт представление о типе архитектуры системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания специалистами ($p \in P$), включающей аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение.

Диагностируемый при обслуживании объект в соответствии с аксиомой 1 может быть представлен как некоторая среда признаков, характеризующих этот объект, и пред-

ставляющий собой прямое произведение пространств признаков A^v . Для признака типа v на каждый признак A^v , как указывалось выше, задана алгебра множеств a^v , которая показывает полноту информации, содержащуюся в сенсором входном сигнале Y . При этом каждый полученный вектор о состоянии конфигурации уплотняется для специалиста P на основе a^v -измеримого множества и полученных подвекторов для каждой образующей

$$U = U(g_i) \text{ в течение времени } t = \sum_{i=1}^n Dt_i. \text{ Будем}$$

полагать, что уплотнение физически происходит в пределах основного процессора. Можно считать, что N - это основной процессор, включающий аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение; система микропрограммирования последнего может модифицировать N . Тогда можно говорить об уплотнении в результате вычислений в N , а не за счёт каких-либо специализированных устройств.

При этом необходимо вводить частичное уплотнение порядка m . Это означает, что формируются не все возможные произведения компонент вектора u , а лишь часть из них.

В соответствии с вышеизложенным, P может самое большее идентифицировать объекты в той степени, в какой это допускает алгебра множества. Поэтому будем считать, что высказывания могут быть представлены в виде булевой функции от комбинированных признаков j_i^v .

В рамках сети формулируется некоторое исчисление высказываний о диагностируемых объектах, которое связывает соответствующие высказывания с P в пространстве входных сигналов Y . Простое высказывание, содержащее признаки только типа v , можно записать в виде

$$C = \bigvee_E j_j^v, \quad (24)$$

где дизъюнкция берётся по некоторому множеству E пар (n, j) , $E \in a^n$.

На базе этих высказываний формируются управляющие воздействия, т. е. некоторый оператор $O(c)$, приводящие к изменению состояния (деформации) объекта диагностики. Оператор, построенный для высказыва-

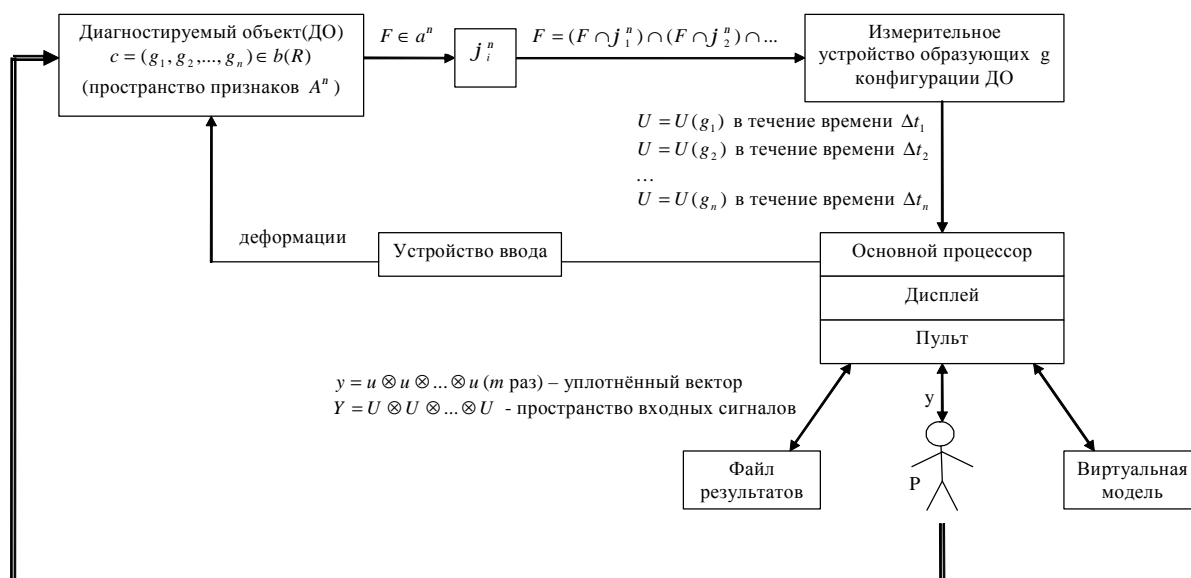


Рис. 1. Модель формирования множества измеримых параметров для оценки технического состояния объекта (ДО) в контексте системы диагностического контроля, представленной сетью, включающей генератрицы в качестве базисных образов.

ния C , активируется некоторым сенсорным вектором $u = u(g)$ тогда и только тогда, когда $C(g) = \text{ИСТИНА}$.

Следуя предложенной методике, можно построить исчисление высказываний для управления состоянием диагностируемого объекта.

Библиографический список

1. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.1. Синтез образов. – М.: Мир, 1979. – 382 с.
2. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.2. Анализ образов. – М.: Мир, 1981. – 448 с.

References

1. Lectures on image theory W. Grenander. Three volumes. Vol. 1. Image synthesis. – Moscow: Mir, 1979 – 382 p.
2. Lectures on image theory W. Grenander. Three volumes. Vol. 2. Image analysis. – Moscow: Mir, 1981 – 448 p.

MODELLING THE ARCHITECTURE OF A SYSTEM CONTROLLING THE CONDITION OF MAINTENANCE OBJECTS

© 2008 A. N. Koptev¹, D. S. Yergaliyev², K. Zh. Sakhanov²

¹Samara State Aerospace University

²Military Institute of Air Defence Forces of Kazakhstan Republic Defence Ministry

The paper present a model of forming a set of a measurable multitude of parameters for assessing the technical condition of an airborne equipment complex (AEC) of aircraft in the context of a diagnostic control system represented by a network which incorporates generatrices as basic images. A set of axioms is proposed for forming the assessment of generatrix condition on the basis of indication vector, the generatrices presenting the AEC system being diagnosed. The architecture of a system of diagnostic control of the maintenance object condition in the form of a network whose functioning is connected with the system of axioms introduced is also proposed.

Model, diagnosed object, multitude, generatrix, image, configuration, network, system, diagnostic control, vector, indication, space, maintenance

Информация об авторах

Коптев Анатолий Никитович, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники, доктор технических наук, профессор, СГАУ. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

Ергалиев Дастан Сырымович, начальник кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан, кандидат технических наук, доцент. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

Саханов Канат Жаксылымович, заместитель начальника кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

Koptev, Anatoly Nikitovitch, head of aircraft maintenance department, doctor of technical science, professor, SSAU. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.

Yergaliyev, Dastan Syrymovitch, head of aircraft engine design and maintenance department, Military Institute of Air Forces, Ministry of Defence of the republic of Kazakhstan, candidate of technical Science, associate professor. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.

Sakhanov, Kanat Zhaksylymovitch, deputy head of aircraft engine design and maintenance department, Military Institute of Air Forces, Ministry of Defence of the republic of Kazakhstan. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.

УДК 519.2

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ НЕКАНОНИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

© 2008 С. Н. Перов, Ю. В. Скворцов

Самарский государственный аэрокосмический университет

При решении задачи статистической динамики требуется по известным вероятностным характеристикам входной случайной функции строить её выборочные функции – реализации. Данная проблема решается представлением случайных процессов в виде детерминированных функций некоторой совокупности случайных величин. Наиболее распространены линейные канонические разложения случайных функций, которые удобно использовать при анализе линейных систем. Для решения нелинейной задачи статистической динамики каноническое разложение по базисным координатным функциям трудно реализуемо. В настоящей работе применяется нелинейная неканоническая форма представления случайных процессов, предложенная в [1].

Стационарный случайный процесс, корреляционная теория, метод интерполяционных полиномов, нелинейное неканоническое разложение

Для неканонического представления стационарных случайных процессов со сложным спектром можно воспользоваться методом интерполяционных полиномов, согласно которому k -я реализация случайного процесса $x(t)$ записывается в виде

$$x_k(t) = \langle x(t) \rangle + g_{k_1} \sin w_{k_3} t + d_{k_2} \cos w_{k_3} t, \quad (1)$$

где $\langle x(t) \rangle$ – математическое ожидание процесса; g_{k_1} , d_{k_2} , w_{k_3} – значения независимых случайных величин g , d , w в узлах интерполирования; номер k определяется соответствующим перебором индексов k_1 , k_2 и k_3 . Поскольку законы распределения случайных величин g и d здесь могут быть произвольными с параметрами $\langle g \rangle = \langle d \rangle = 0$,

$D_g = D_d = D_x$ (где D_x – дисперсия стационарного процесса $x(t)$), то целесообразно задавать их нормальными. При этом функция плотности вероятности случайной величины w определяется выражением

$$f(w) = \frac{2}{p D_x} \int_0^{\infty} \hat{E}_x(t) e^{-iwt} dt = \frac{S_x(w)}{D_x}. \quad (2)$$

Здесь $K_x(t)$ и $S_x(w)$ – корреляционная функция и спектральная плотность исходного стационарного случайного процесса $x(t)$.

В рамках корреляционной теории неканоническое разложение вида (1) обеспечивает абсолютно точное представление случайных процессов. Небольшое число случайных величин (g , d , w) даёт возможность разработки эффективного алгоритма получения реализаций случайных процессов заданной спектральной плотности.

Для определения узлов интерполяции случайной величины w целесообразно не искать соответствующую систему ортогональных полиномов, а выполнить u -преобразование.

В табл. 1 представлены аналитические выражения для корреляционных функций и спектральных плотностей случайных процессов, которые наиболее часто употребляются в практике для аппроксимации реальных характеристик [2]. В эти зависимости входят следующие параметры: D – дисперсия процесса, a – коэффициент затухания корреляционной функции, w_0 – собственная круговая частота нелинейной системы, w_c – предельная круговая частота.

В табл. 2 для каждой спектральной плотности приведены функция распределения случайной величины w

$$F(w) = \int_0^w f(w) dw$$

и u -преобразование для получения узлов

Таблица 1. Корреляционные функции и спектральные плотности некоторых стационарных случайных процессов

№ процесса	$K(t)$	$S(w)$
1	$D \frac{\sin w_c t}{w_c t}$	$\frac{D}{w_c}, 0 \leq w \leq w_c$
2	$D \frac{\sin w_c t}{w_c t} (2 \cos w_c t - 1)$	$\frac{D}{w_c}, w_c \leq w \leq 2w_c$
3	$D e^{-a t }, a > 0$	$\frac{2D}{p} \frac{a}{a^2 + w^2}$
4	$D e^{-a^2 t^2}$	$\frac{D}{a\sqrt{p}} \exp\left(-\frac{w^2}{4a^2}\right)$
5	$D e^{-a t } \cos w_0 t, a > 0$	$\frac{2aD}{p} \frac{w^2 + a^2 + w_0^2}{(w^2 - a^2 - w_0^2)^2 + 4a^2 w^2}$
6	$D e^{-a t } \left(\cos w_0 t - \frac{a}{w_0} \sin w_0 t \right), a > 0$	$\frac{4aD}{p} \frac{w^2}{(w^2 + a^2 + w_0^2)^2 - 4w_0^2 w^2}$

Таблица 2. Функции распределения и у-функции

№ процесса	$F(w)$	$w = y(x)$
1	$\frac{w}{w_c}$	$w = \frac{w_c}{2} (x+1)$
2	$\frac{w}{w_c} - 1$	$w = \frac{w_c}{2} (x+3)$
3	$\frac{2}{p} \operatorname{arctg} \frac{w}{a}$	$w = a \operatorname{tg} \frac{p(x+1)}{4}$
4	$\operatorname{erf} \left(\frac{w}{2a} \right)$	$\operatorname{erf} \left(\frac{w}{2a} \right) = \frac{1}{2} (x+1)$
5	$\frac{1}{p} \left(\operatorname{arctg} \frac{w+w_0}{a} + \operatorname{arctg} \frac{w-w_0}{a} \right)$	$w = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + (a^2 + w_0^2)t^2}}{t};$ $t = \operatorname{tg} \frac{p(x+1)}{2};$ "+" i ðè $t > 0$; "-" i ðè $t < 0$
6	$\frac{a}{2pw_0} \ln \left \frac{w^2 - 2w_0 w + a^2 + w_0^2}{w^2 + 2w_0 w + a^2 + w_0^2} \right +$ $+\frac{1}{p} \left(\operatorname{arctg} \frac{w+w_0}{a} + \operatorname{arctg} \frac{w-w_0}{a} \right)$	$\frac{a}{w_0} \ln \left \frac{w^2 - 2w_0 w + a^2 + w_0^2}{w^2 + 2w_0 w + a^2 + w_0^2} \right +$ $+2 \left(\operatorname{arctg} \frac{w+w_0}{a} + \operatorname{arctg} \frac{w-w_0}{a} \right) = p(x+1)$

интерполяции по соответствующим узлам интерполяции случайной величины, распределенной по равномерному закону:

$$F(x) = \frac{1}{2}(x+1), \quad x \in [-1; 1].$$

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что для нахождения значений узлов интерполяции процессов вида 4 и 6 необходимо решать трансцендентное уравнение. Поэтому в этом случае получить решение возможно только с

применением тех или иных итерационных алгоритмов.

Реальный широкополосный случайный процесс можно схематизировать суперпозицией n процессов, имеющих типовые спектральные плотности с одним максимумом (табл. 1). При этом спектральную плотность широкополосного процесса можно представить как

$$S_x(w) = \sum_{i=1}^n S_{x_i}(w),$$

где $S_{x_i}(w)$ – спектральная плотность узкополосного процесса, имеющая стандартный вид.

Аналогично для корреляционной функции можно записать

$$K_x(t) = \sum_{i=1}^n K_{x_i}(t).$$

Используя и далее принцип суперпозиции, неканоническое разложение реального процесса можно осуществить в виде

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [\langle x_i(t) \rangle + g_i \sin w_i t + d_i \cos w_i t].$$

Тогда конкретные реализации случайного процесса с использованием метода интерполяционных полиномов будут определяться как

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^n [\langle x_i(t) \rangle + g_{i_{k_1}} \sin w_{i_{k_3}} t + d_{i_{k_2}} \cos w_{i_{k_3}} t] \\ (k = 1, 2, \dots, q; q = \prod_{i=1}^n q_{i1} q_{i2} q_{i3}). \quad (3)$$

Здесь $g_{i_{k_1}}$, $d_{i_{k_2}}$ – узлы интерполяции случайных величин нормального закона распределения, которые находятся по формулам

$$g_{i_{k_1}} = I_{k_1} \sqrt{D_{x_i}}; \quad d_{i_{k_2}} = I_{k_2} \sqrt{D_{x_i}} \\ (k_s = 1, 2, \dots, q_{is}; s = 1, 2),$$

где I_{k_s} – табулированные значения узлов типа Чебышева центрированного нормированно-

го нормального распределения; $w_{i_{k_3}}$ – узлы интерполяции случайной величины w_i , определяемые с помощью u -преобразования (табл. 2); q_{i1} , q_{i2} и q_{i3} – числа узлов интерполяции, выбираемые соответственно для переменных g_i , d_i и w_i случайного процесса $x_i(t)$.

Были исследованы возможности неканонического разложения случайных процессов сложной структуры с помощью метода интерполяционных полиномов (3). При этом приближённые значения корреляционной функции процесса определялись по отдельным его реализациям с использованием зависимости

$$K_x^i(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{k_1=1}^{q_{i1}} \sum_{k_2=1}^{q_{i2}} \sum_{k_3=1}^{q_{i3}} d_{i_{k_2}} (g_{i_{k_1}} \sin w_{i_{k_3}} t + d_{i_{k_2}} \cos w_{i_{k_3}} t) r_{k_1} r_{k_2} r_{k_3} \right\}, \quad (4)$$

где r_{k_1} , r_{k_2} , r_{k_3} – числа Кристоффеля случайных величин g_i , d_i и w_i .

Сглаженная оценка спектральной плотности находилась по дискретным значениям корреляционной функции

$$S_x^i(w) = \frac{2}{p} \Delta t \sum_{r=0}^{L-1} K_{xr} \Omega(r) \cos(wr\Delta t). \quad (5)$$

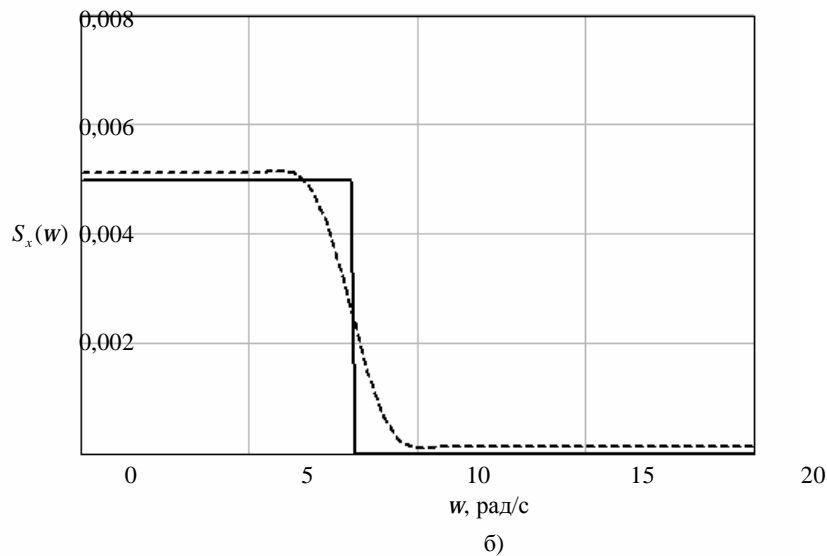
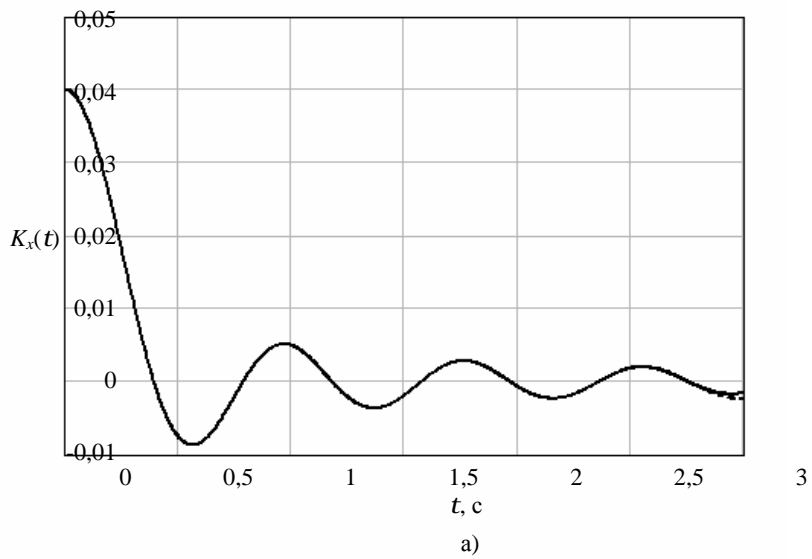
Здесь Δt – шаг дискретизации корреляционной функции по времени; $K_{xr} = K_x(r\Delta t)$ – дискретные значения корреляционной функции; $\Omega(r) = 0,5[1 + \cos(pr/L)]$ – сглаживающее «окно» Тьюки [3]; L – точка отсечения «окна».

Оценки, полученные по формулам (4) и (5), сравнивались с точными значениями корреляционной функции и спектральной плотности. Поскольку вычисления по формуле (5) позволяют находить лишь приближённую оценку спектральной плотности, проводилось качественное сравнение спектров. Следует отметить, что критерием точности в методе интерполяционных полиномов является сравнение значений корреляционных функций в соответствующие моменты времени.

На рис. 1...4 представлены теоретические и рассчитанные методом интерполяционных полиномов значения корреляционных функций и спектральных плотностей типовых узкополосных процессов с номерами 1, 2, 3 и 5 соответственно (табл. 1). Используемые при этом исходные данные сведены в табл. 3.

На рис. 5 приведены результаты для случайного процесса сложной структуры, полученного суперпозицией всех четырёх изображённых на рис. 1...4 узкополосных процессов.

Анализ результатов показывает, что надлежащим выбором числа узлов интерполяции случайных величин g , d и w неканонического разложения можно добиться достаточно точного представления реализаций узкополосных процессов и случайных процессов сложной структуры. Это доказывает приемлемость принципа суперпозиции при моделировании реализаций. Следует отметить, что для случайных величин g и d достаточно брать по два узла интерполяции, а для параметра w требуется от восьми до шестнадцати узлов.



— — — — — теоретические значения
 - - - - - рассчитанные значения

Рис. 1. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) узкополосного процесса №1 (число узлов $q_g = q_d = 2$; $q_w = 8$)

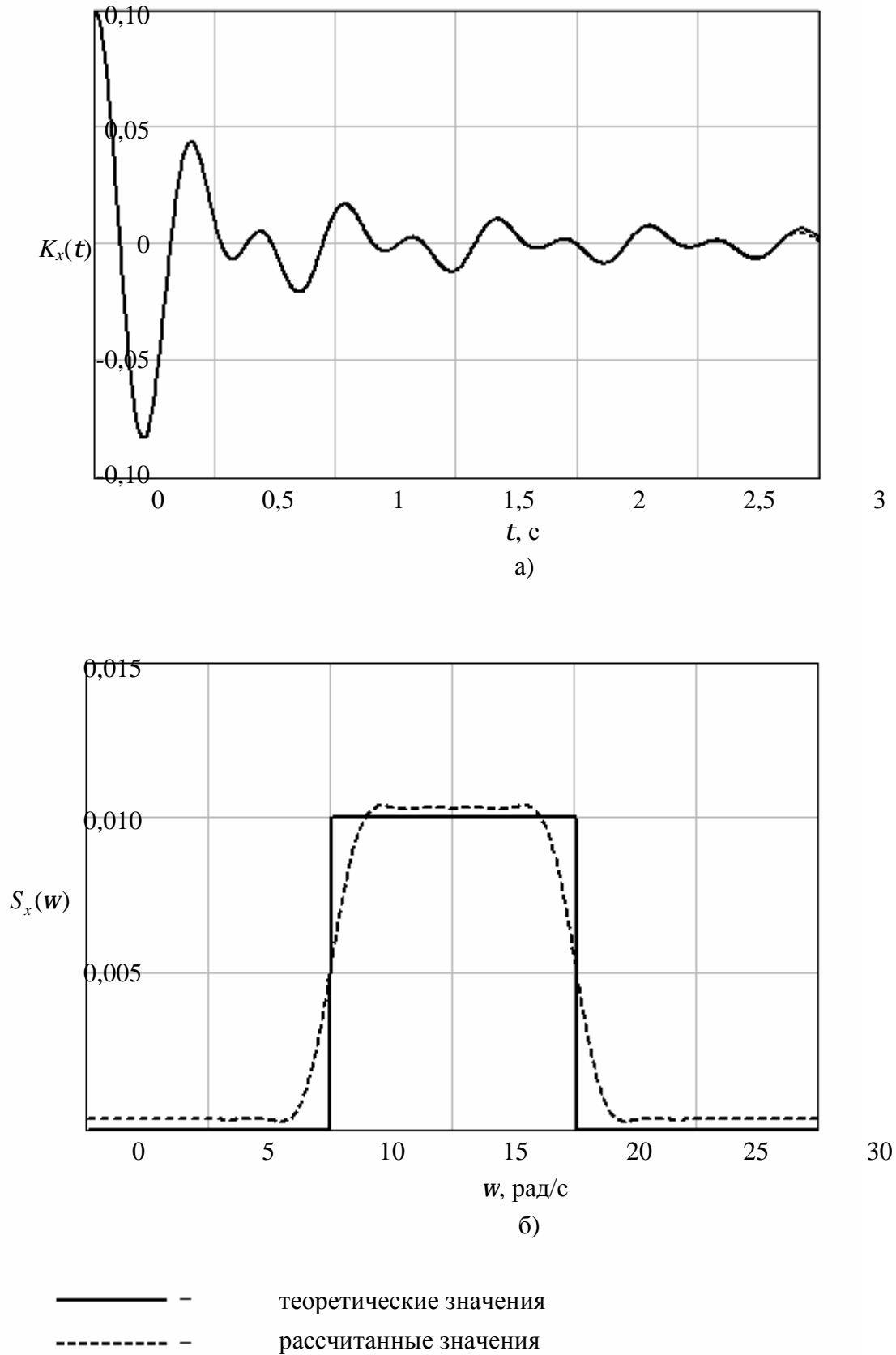
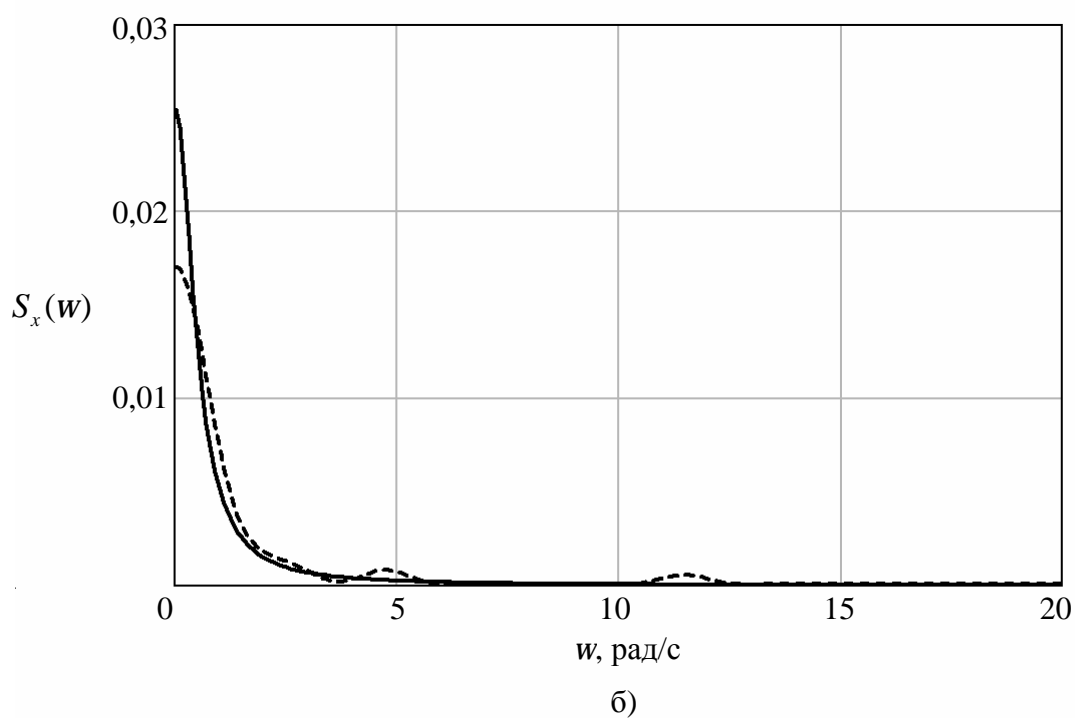
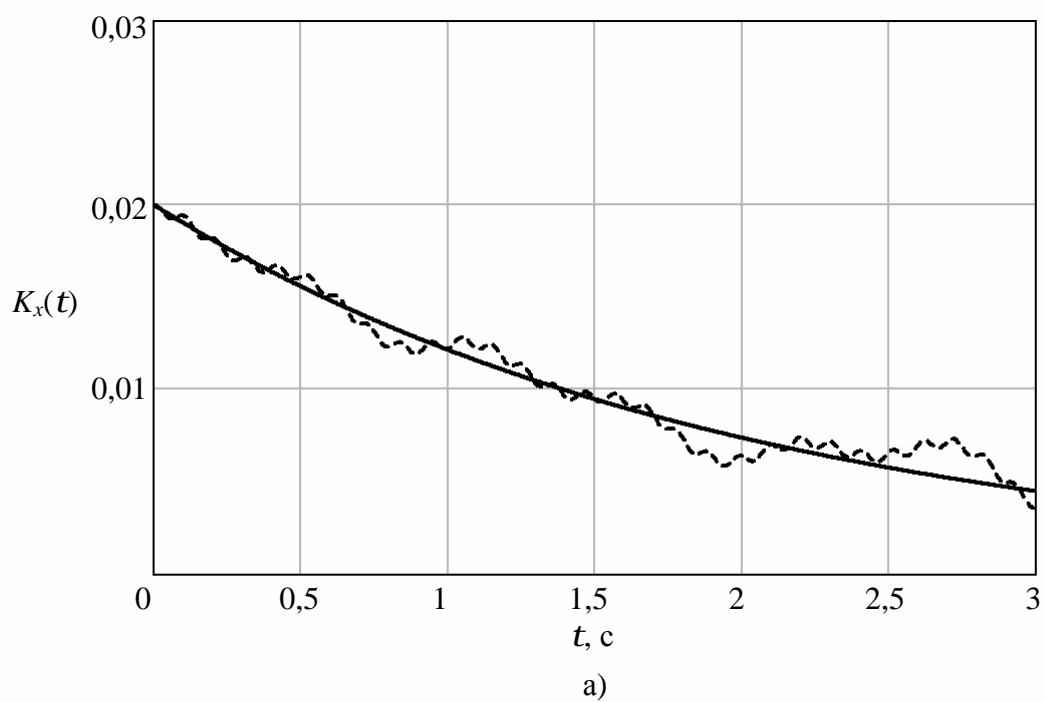
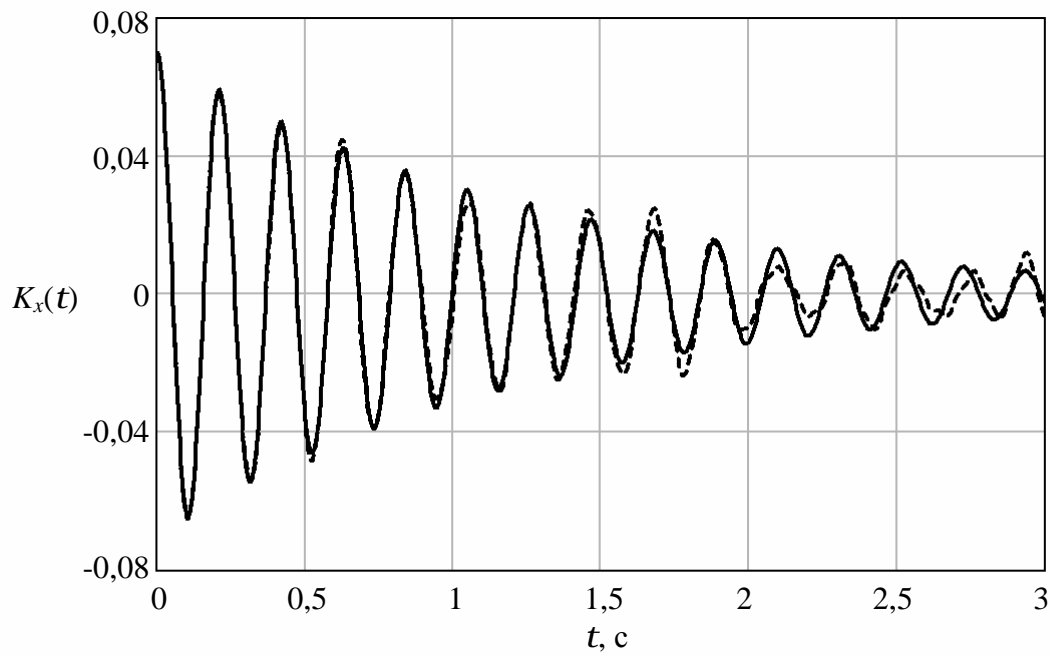


Рис. 2. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) узкополосного процесса №2 (число узлов $q_y = q_d = 2$; $q_w = 10$)

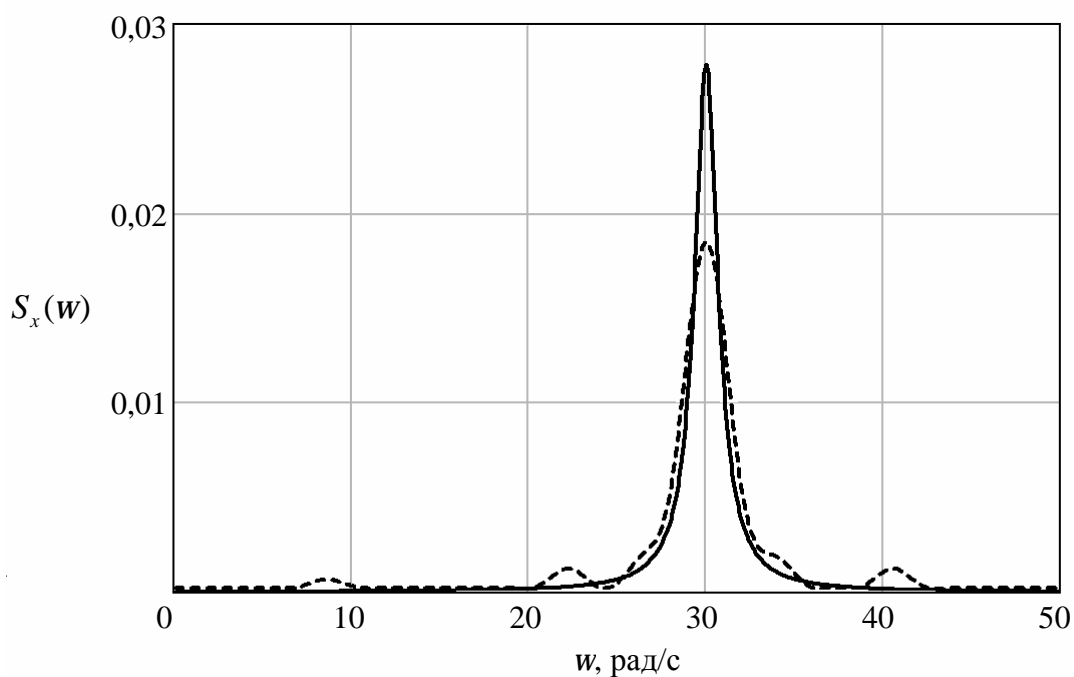


— — теоретические значения
 - - - - - рассчитанные значения

Рис. 3. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) узкополосного процесса №3 (число узлов $q_g = q_d = 2$; $q_w = 16$)



а)

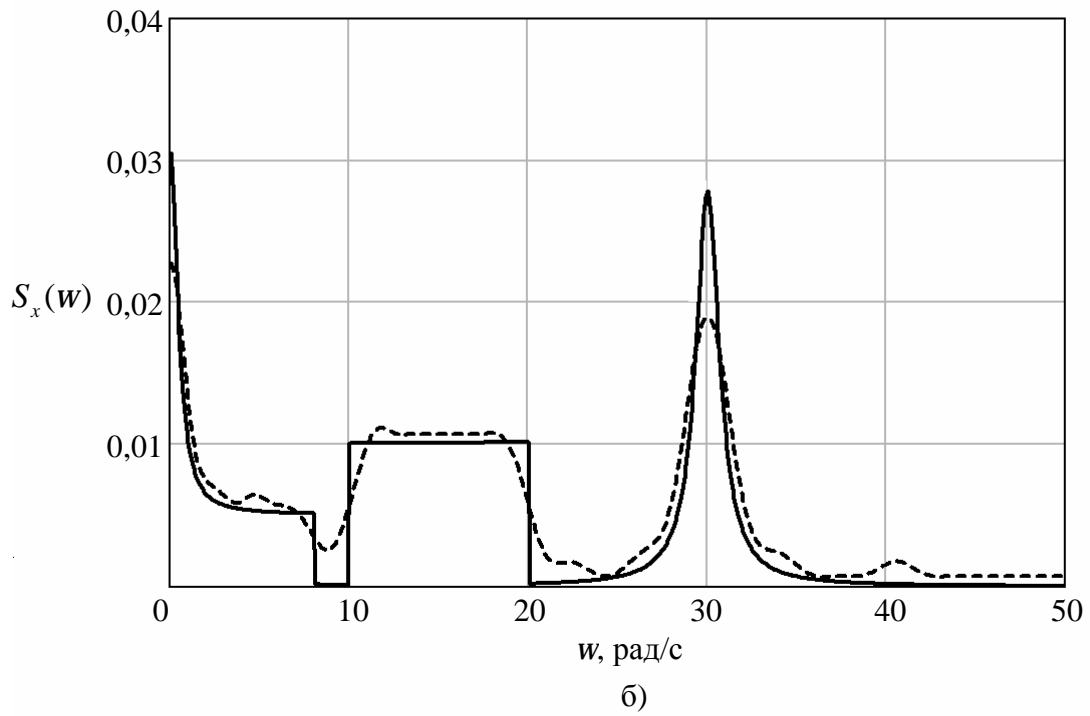
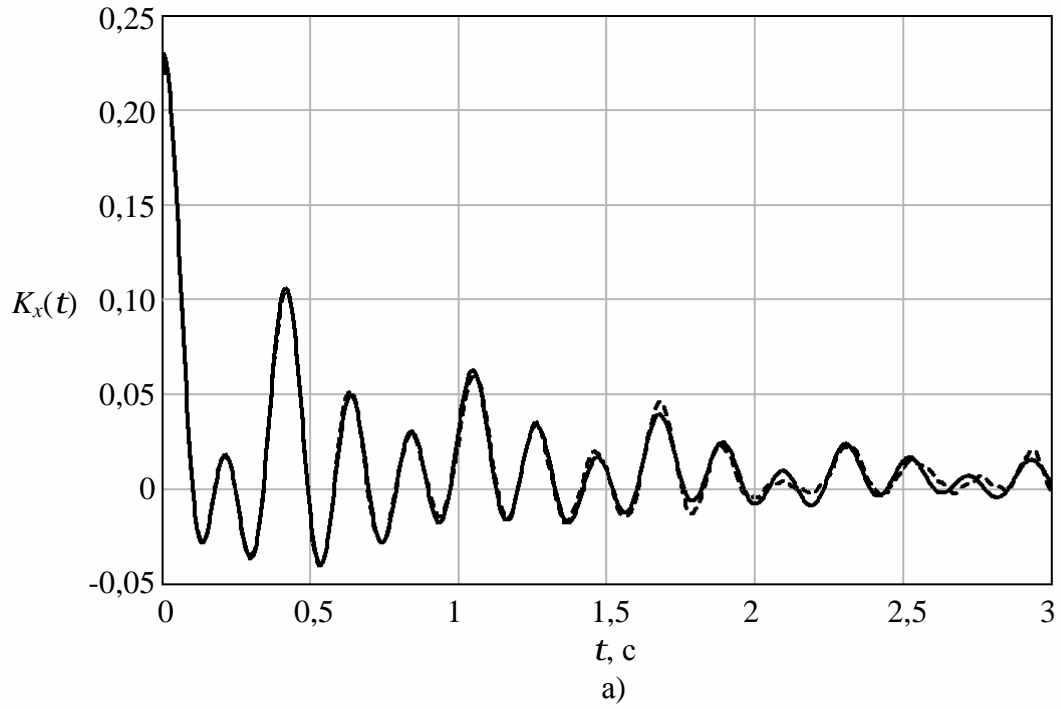


б)

— — теоретические значения

- - - - - рассчитанные значения

Рис. 4. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) узкополосного процесса №5 (число узлов $q_g = q_d = 2$; $q_w = 16$)



————— — теоретические значения
 - - - - - — рассчитанные значения

Рис. 5. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) случайного процесса сложной структуры

Таблица 3. Параметры узкополосных процессов

№ процесса	D	w_c , рад/с	α , 1/с	w_o , рад/с
1	0,04	8	–	–
2	0,1	10	–	–
3	0,02	–	0,5	–
5	0,07	–	0,8	30

Библиографический список

1. Чернецкий, В. И. Анализ точности нелинейных систем управления / В. И. Чернецкий. – М.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
2. Гусев, А. С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
3. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. – М.: Мир, 1972. – Вып.2. – 287 с.

References

1. V. I. Tchernetsky. Analysis of non-linear control system accuracy. / V. I. Tchernetsky. – Moscow: “Mashinostroyeniye” (Machine building), 1968. – 248 pp.
2. A. S. Gusev. Analysis of structures under random exposures / A. S. Gusev, V. A. Svetlitsky. – Moscow: “Mashinostroyeniye” (Machine building), 1984. – 240 pp.
3. G. Jenkins. Spectral analysis and its applications / G. Jenkins, D. Watts. – Moscow: Mir, 1972. – issue 2. – 287 pp.

RANDOM PROCESS PRESENTATION BY NON-CANONICAL DECOMPOSITION

© 2008 S. N. Perov, Yu. V. Skvortsov

Samara State Aerospace University

When solving a problem of statistic dynamics it is necessary to build its selected functions-realizations- by the known probability characteristics of an input random function. This problem is solved by presenting random processes as determinate functions of a set of random variables. Linear canonical decompositions of random functions are most commonly used. They are convenient to use in linear system analysis. It is, however, hardly feasible to use canonical decomposition on basic coordinate functions in order to solve a non-linear problem. This paper deals with a non-linear non-canonical form of presenting random processes proposed in [1].

Stationary random process, correlation theory, method of interpolation polynomials, non-linear non-canonical decomposition.

Информация об авторах

Перов Сергей Николаевич, доцент кафедры прочности летательных аппаратов, кандидат технических наук, доцент; место работы: кафедра прочности летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета; область научных интересов: надежность, динамика и прочность конструкций, механика разрушения, усталостное разрушение.

Скворцов Юрий Васильевич, доцент кафедры прочности летательных аппаратов, кандидат технических наук, доцент; место работы: кафедра прочности летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета; область научных интересов: надежность, динамика и прочность конструкций, механика разрушения, метод конечных элементов.

Perov Sergey Nikolayevitch, Associate Professor of Aircraft Strength Department, Candidate of Technical Science, Associate Professor; office: Aircraft Strength Department, Samara State Aerospace University; area of research: structure reliability, dynamics and strength, destruction mechanics, fatigue failure.

Skvortsov Yuri Vassilievitch, Associate Professor of Aircraft Strength Department, Candidate of Technical Science, Associate Professor; office: Aircraft Strength Department, Samara State Aerospace University; area of research: structure reliability, dynamics and strength, destruction mechanics, finite element method.

УДК 510.5

МЕТОДИКА ВЫБОРА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ С УЧЁТОМ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2008 В. В. Рыжаков¹, М. В. Кузнецова¹, М. В. Рыжаков²

¹Пензенская государственная технологическая академия

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный Московской области

Проанализировано понятие алгоритма, и в качестве метода оценивания метрологических характеристик алгоритмов степени соответствия объектов функциональному назначению предложена и рассмотрена методика выбора алгоритмов на основе дисперсионного анализа. Исследованы различные алгоритмы.

Метрологическая характеристика, алгоритм, степень соответствия, качество, дисперсия, продукция, объект

Впервые системный подход как методологическая база исследования алгоритмов был предложен А. Черчем (США, 1936 г.) [1]. История развития ведёт к основополагающим работам отечественных ученых А. Н. Колмогорова и В. А. Успенского. Универсальный подход к моделированию алгоритмов, предложенный А. Н. Колмогоровым, позволил сделать вывод: имея любую модель алгоритма, можно синтезировать другие модели, «и поэтому основные понятия теории алгоритмов можно изложить в терминах функций... все известные в математике алгоритмы моделируются.... функциями» [2, 3].

В данной статье понятие алгоритм рассматривается как реальный объект, представленный моделью алгоритма степени соответствия в виде функций единичных показателей качества (соответствия), т.е. как функция вида $Q = f(g, S, m, n)$. Здесь g - весовые коэффициенты единичных показателей, S - единичные показатели соответствия, m - число показателей, n - объёмы статистик для определения показателей (в статье не используется).

Используется понятие алгоритма, а не функция оценивания. Это связано с тем, что в зависимости от корпоративных интересов разработчиков, заказчиков объектов весовые коэффициенты g могут изменяться по определённым зависимостям (функциям) от по-

рядка ранжирования, т.е. могут вводиться дополнительные операции в процедуры вычисления Q .

Целью является разработка методики выбора (синтеза) алгоритмов оценивания качества - степени соответствия объектов функциональному назначению с учётом их эффективности и метрологических оценок параметров исследуемых объектов.

Под функциональным назначением понимается способность объектов выполнять те функции, которые закладывались при их разработке. Эти способности характеризуются набором параметров единичных показателей, которые имеют различную значимость (вес) при оценивании функционирования объектов.

Для того, чтобы объединить указанные параметры, характеризующие функциональное соответствие объектов, в один показатель, который назовём степенью соответствия, что означает «степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования...», предлагается выбрать (синтезировать) соответствующий алгоритм после исследования его эффективности и метрологических характеристик, т.е. метрологических характеристик оценок соответствия, полученных на основе этого алгоритма.

Под эффективностью алгоритмов понимается их свойство, которое определяется величинами дисперсий получаемых оценок

соответствия: меньше дисперсия (по сравнению с дисперсиями оценок, полученных на основе других алгоритмов) - выше эффективность данного алгоритма, и наоборот.

Метрологические характеристики алгоритма предлагается выражать или дисперсиями оценок показателей соответствия (качества), вызванных дисперсиями оценивания параметров объектов, или средними квадратическими отклонениями параметров объектов.

При оценивании эффективности предлагается принимать одни и те же предельные вариации (изменения) параметров для оценивания метрологических характеристик - фактические погрешности (дисперсии) результатов измерения (контроля) тех же параметров.

Изложенная методология позволяет разрешить существующее в настоящее время противоречие, которое сводится к следующему. Известен ряд алгоритмов (критериев) определения степени соответствия, но обоснованно выбрать из их числа более соответствующий затруднительно, поскольку не исследованы эффективность, несмещённость, а также метрологические свойства.

Известные работы имеют ограниченную информацию и являются недостаточными, а эксперименты на основе числовых таблиц Кадырова [5] являются неточными в связи с тем, что они далеки от идеалов.

Предлагается методика оценивания метрологических характеристик (дисперсий) комплексных показателей степени соответствия - выборочных средних и на их основе оценивания эффективности алгоритмов и синтеза обобщённого алгоритма на основе комплексных алгоритмов по наиболее эффективной схеме (средней гармонической).

Новизна данного подхода состоит в том, что подобные (обобщённые) алгоритмы нивелируют мажорантность различных выборочных средних, тем самым снижая смещённость оценок показателей степени соответствия показателя и устраняя одну из сторон указанного противоречия.

Всё отмеченное позволяет получить более точные и несмещённые оценки степени соответствия объектов функциональному назначению, а значит, и получить возмож-

ность более обоснованного выбора продукции потребителем.

Рассмотрим методики через соответствующие аналитические выкладки.

В качестве метода оценивания указанных характеристик выбран дисперсионный анализ. На первом этапе используем его для комплексных структур алгоритмов, а затем конкретизируем.

Алгоритмы выборочных средних в обобщённой форме представляются в виде [6]

$$\mathcal{G}_k = \left(\sum_{i=1}^m \frac{S_i^k}{m} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (1)$$

где S_i - i -ый единичный показатель соответствия, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$; m - число единичных показателей соответствия; $k \in \{-1; 0; 1; 2\}$; $k = -1$ соответствует средней гармонической, $k = 0$ - средней геометрической, $k = 1$ - средней арифметической, $k = 2$ - средней квадратической оценкам.

Все единичные показатели носят случайный характер и определяются [7]

$$S_i = \frac{F_i}{F_{i_0}}, \quad (2)$$

где F_i - результат измерения i -ой характеристики (параметра) продукции; F_{i_0} - ее эталонное значение.

Значения F_i и S_i являются параметрами модели алгоритма (1). Так как F_i может быть физической величиной, значение которой определяется на основе прямых измерений, то $S_i(F_i)$ имеет погрешность [8]. В связи с этим для оценивания эффективности и метрологических характеристик рассматриваемых алгоритмов необходимо использовать информацию, связанную с чувствительностями к единичным показателям и с соответствующими дисперсиями.

Для определения указанных чувствительностей воспользуемся производными

$\frac{\partial \mathcal{G}_k}{\partial S_i}$, а для оценивания эффективности и погрешности \mathcal{G}_k – дисперсионным подходом. В этом случае можно использовать непосредственно значение дисперсии $D(\mathcal{G}_k)$, полученное на основе знания оценок дисперсий единичных показателей S_i . Далее по известным $D(\mathcal{G}_k)$ можно получить значение среднеквадратической погрешности $\sigma(\mathcal{G}_k)$.

Так как S_i – независимые случайные величины, $D(\mathcal{G}_k)$ можно выразить следующим образом:

$$D(\mathcal{G}_k) = \sum_{i=1}^m (\mathcal{G}_{kS_i})^2 D(S_i), \quad (3)$$

где \mathcal{G}_{kS_i} – чувствительности алгоритма \mathcal{G}_k к S_i .

В зависимости от k чувствительности \mathcal{G}_{kS_i} будут существенно различаться. Определим их для всех k и в соответствии с (1) представим \mathcal{G}_{kS_i} в виде

$$\mathcal{G}_{kS_i} = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^m \frac{S_i^k}{m} \right)^{\frac{1}{k}-1} \cdot \frac{k}{m} \cdot S_i^{k-1} = \frac{1}{m} \cdot S_i^{k-1} \left(\sum_{i=1}^m \frac{S_i^k}{m} \right)^{\frac{1}{k}-1}. \quad (4)$$

Конкретно для каждого k выражение (4) можно преобразовать:

для $k = -1$

$$\mathcal{G}_{-1S_i} = \frac{1}{m} \cdot S_i^{-2} \left(\sum_{i=1}^m \frac{S_i^{-1}}{m} \right)^{-2} = \frac{m}{S_i^2 \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i} \right)^2}; \quad (5)$$

для $k = 0$

$$\mathcal{G}_{0S_i} = \frac{\left(\prod_{i=1}^m S_i \right)^{\frac{1}{m}}}{m \cdot S_i}; \quad (6)$$

для $k = 1$

$$\mathcal{G}_{1S_i} = \frac{1}{m}; \quad (7)$$

для $k = 2$

$$\mathcal{G}_{2S_i} = \frac{1}{m} \cdot S_i^{2-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^m \frac{S_i^2}{m} \right)^{\frac{1}{2}-1} = \frac{1}{m} \cdot \frac{S_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{S_i^2}{m}}} = \frac{S_i}{\sqrt{m \sum_{i=1}^m S_i^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, обобщённая форма алгоритмов выборочных средних (1) позволяет достаточно просто получить выражения чувствительностей (5)-(8) различных видов алгоритмов к единичным показателям качества S_i .

В выражении (3) остаются неизвестными величины дисперсий $D(S_i)$, и поэтому оценим их.

В общем виде единичный показатель S_i в (3) может быть представлен как взвешенная величина с учетом весовых коэффициентов и единичных показателей качества (2)

$$S_{ie} = g_i \cdot S_i = g_i \cdot \left(\frac{F_i}{F_{i0}} \right), \quad (9)$$

где g_i – весовой коэффициент (коэффициент важности) единичного показателя S_i в алгоритме вида (1).

В связи с тем, что g_i и F_{i0} назначают эксперты, то они могут быть заданы с определёнными ошибками и, следовательно, вносить в силу своих вариаций определённый вклад в дисперсию значений \mathcal{G}_k [9].

С учётом (9) и статистической независимости g_i, F_i, F_{i0} общий вид $D(S_{ie})$ можно определить следующим образом:

$$D(S_{ie}) = \left(\frac{g_i}{F_{i0}} \right)^2 \cdot D(F_i) + \left(\frac{g_i \cdot F_i}{F_{i0}^2} \right)^2 \cdot D(F_{i0}) + \left(\frac{F_i}{F_{i0}} \right)^2 \cdot D(g_i), \quad (10)$$

где $D(F_i), D(F_{i\bar{v}}), D(g_i)$ - соответственно дисперсии $F_i, F_{i\bar{v}}$ и g_i .

При прямых измерениях параметров F_i дисперсия $D(F_i)$ будет определяться совокупностью погрешностей, которые присущи средствам измерения (СИ). В этом случае, если класс точности СИ указан в виде дроби γ_k/γ_n , где γ_k - приведенная к пределу измерения погрешность в конце, а γ_n - приведенная погрешность в начале диапазона измерения F_i , то дисперсию F_i можем представить так:

$$D(F_i) = \left(\frac{\gamma_{ni} \cdot F_{ik}}{100} \right)^2 + \left[\frac{(\gamma_{ki} - \gamma_{ni}) \cdot F_i}{100} \right]^2, \quad (11)$$

где F_{ik} - предел измерения СИ.

Аналогично оценивается дисперсия $D(F_i)$ при задании класса точности СИ в виде γ_s и γ_n :

$$D(F_i) = \left(\frac{\gamma_s \cdot F_i}{100} \right)^2; \quad (11a)$$

$$D(F_i) = \left(\frac{\gamma_n \cdot F_i}{100} \right)^2. \quad (11б)$$

Как указывалось выше, значение $F_{i\bar{v}}$ представлено эталоном. Оно чаще всего носит виртуальный характер, и поэтому погрешность будет иметь одновременно систематический для всей совокупности проверяемой продукции и случайный характер выбора.

При экспертном методе задания $F_{i\bar{v}}$ дисперсию $D(F_{i\bar{v}})$ можно оценить так:

$$D(F_{i\bar{v}}) = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (F_{ij\bar{v}} - \bar{F}_{i\bar{v}})^2, \quad (12)$$

где J - число экспертов; $\bar{F}_{i\bar{v}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J F_{ij\bar{v}}$; $F_{ij\bar{v}}$ - оценка j -го эксперта $F_{i\bar{v}}$ -го параметра эталона.

В выражении (10) осталось оценить $D(g_i)$ - дисперсию g_i весового коэффициента F_i параметра продукции. В качестве приближения $D(g_i)$ можно рекомендовать $\pm \gamma\%$ -ое предельное колебание коэффициента от его номинального значения. Если в качестве номинального значения выбрать

$$g_i = \frac{1}{m}, \quad (13)$$

то при равномерном распределении g_i значения в интервале

$$\left[\left(1 - \frac{\gamma}{100} \right) \cdot \frac{1}{m}; \left(1 + \frac{\gamma}{100} \right) \cdot \frac{1}{m} \right]$$

дисперсию $D(g_i)$ можно выразить так:

$$D(g_i) = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{m^2}. \quad (14)$$

Особенность выбора указанного коэффициента в том, что, если происходит завышение (занижение) g_i коэффициента, на столько же произойдет занижение (завышение) соответственно весовых коэффициентов других параметров продукции (по причине необходимого соблюдения условия норми-

ровки $\left(\sum_{i=1}^m g_i = 1 \right)$). Этот же вывод подтвердился и численным экспериментом [5]. Указанная вариация g_i скажется существенно в том случае, если вариация единичных показателей степени соответствия $(F_i/F_{i\bar{v}})$ также происходит в широких пределах. Но это возможно только на этапах отработки объектов (продукции) при налаживании производства. В других случаях влиянием вариаций g_i можно пренебречь.

Рассмотрим правила оценивания g_k . В связи с тем, что в оценках \mathcal{G}_k учитываются весьма разнообразные свойства объектов, при решении данной задачи (оценивания g_k) не-

обходимо иметь и соответствующий банк специалистов-экспертов. При этом допустима избыточность, которая позволит снизить дисперсию (14). Для лучшей ориентации в свойствах исследуемых объектов целесообразно использовать их рубрикаторы, которые должны быть заранее составлены, подготовлены. Указанная избыточность числа экспертов желательна и для того, чтобы нивелировать различные (ограниченные) знания и опыт экспертов, которые сказываются в отличии составленных различными экспертами ранжировок показателей соответствия друг от друга, а значит и повысить точность оценивания g_i . Указанная статистическая тенденция и позволит снизить γ -предельное колебание оценок g_i .

Расчёты дисперсий по (3) с \mathcal{G}_k при $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$ и при одних и тех же дисперсиях S_i показали, что минимальной дисперсией, т.е. наибольшей эффективностью, обладает \mathcal{G}_k при $k = -1$ [9].

В связи с этим предложено на основе нечёткой логики [2] выражение обобщённого гармонического алгоритма \bar{Q}_{or} , как наиболее эффективного и менее смещённого, позволяющего нивелировать мажорантность $\mathcal{G}_{-1}, \mathcal{G}_0, \mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$:

$$\bar{Q}_{or} = \frac{\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}} + \frac{1}{\mathcal{G}_0} + \frac{1}{\mathcal{G}_1} + \frac{1}{\mathcal{G}_2}}{\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_0^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_1^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_2^2}}, \quad (15)$$

где $\mathcal{G}_{-1}, \mathcal{G}_0, \mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ - оценки комплексных выборочных средних гармонической, геометрической, арифметической, квадратической; k - номер выборочной средней, $k \in (-1, 0, 1, 2)$.

Число выборочных средних можно менять путём учёта и других видов.

Для того, чтобы определить дисперсию \bar{Q}_{or} , обусловленную дисперсиями оценок

$\mathcal{G}_{-1}, \mathcal{G}_0, \mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$, необходимо найти чувствительности $\bar{Q}'_{or\mathcal{G}_{-1}}; \bar{Q}'_{or\mathcal{G}_0}; \bar{Q}'_{or\mathcal{G}_1}; \bar{Q}'_{or\mathcal{G}_2}$.

Из выражения (1) с учётом (15) в соответствии с (3) путем несложных преобразований получим оценку дисперсии обобщённого гармонического алгоритма:

$$D(\bar{Q}_{or}) = \sum_k \left(Q'_{or\mathcal{G}_k} \right)^2 \cdot D(\mathcal{G}_k), \quad (16)$$

где $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$.

В развёрнутом виде (16) можно записать

$$D(\bar{Q}_{ia}) = D_1(Q_{ia}(\hat{Q}_{-1})) + D_2(Q_{ia}(\hat{Q}_0)) + D_3(Q_{ia}(\hat{Q}_1)) + D_4(Q_{ia}(\hat{Q}_2)),$$

$$\text{где } D_1(Q_{or}(\mathcal{G}_{-1})) = \frac{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}}\right)^2 \cdot D(\mathcal{G}_{-1})}{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_0^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_1^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_2^2}\right)^2};$$

$$D_2(Q_{or}(\mathcal{G}_0)) = \frac{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_0}\right)^2 \cdot D(\mathcal{G}_0)}{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_0^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_1^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_2^2}\right)^2};$$

$$D_3(Q_{or}(\mathcal{G}_1)) = \frac{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_1}\right)^2 \cdot D(\mathcal{G}_1)}{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_0^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_1^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_2^2}\right)^2};$$

$$D_4(Q_{or}(\mathcal{G}_2)) = \frac{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_2}\right)^2 \cdot D(\mathcal{G}_2)}{\left(\frac{1}{\mathcal{G}_{-1}^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_0^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_1^2} + \frac{1}{\mathcal{G}_2^2}\right)^2}.$$

Таким образом, предложенный дисперсионный подход к исследованию позволяет получить обоснованные рекомендации по

выбору лучших из известных алгоритмов (по характеристикам несмещённости и эффективности) для использования в системах оценивания качества. Разработанный инструментарий представляет необходимые средства для разработки конкурентоспособных образцов продукции в соответствии с актуальными техническими требованиями и рекомендациями по их реализации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 08-08-0619.

Библиографический список

1. Математика и кибернетика в экономике. Словарь – справочник./ Сост. Н. Н. Гонтарова, М. Б. Немчикова, А. А. Попова. - М.: Издательство «Экономика», 1975.
2. Колмогоров, А. Н. О понятии алгоритма // Успехи математических наук. - 1953. - №8: 4(56). - С. 175-176.
3. Колмогоров, А. Н. К определению алгоритма /А. Н. Колмогоров, В. А. Успенский // Успехи математических наук. - 1958. - №3:6. - С. 3-28.

References

1. Mathematics and cybernetics in economics. Reference book. / N. N. Gontarova, M. B. Nemchikova, A. A. Popova. Moscow: "Economy" publishing house, 1975.
2. Kolmogorov, A. N. On the algorithm concept. // Advances of mathematical science (Uspekhy matematicheskikh nauk) – 1953 – No. 8:4 (56) – pp. 175-176.
3. Kolmogorov, A. N. Defining an algorithm / A. N. Kolmogorov, V. A. Uspensky // Advances of mathematical science (Uspekhy matematicheskikh nauk) – 1958. – No. 3:6. – pp. 3-28.
4. GOST R ISO 9000-2001. Systems of quality management. Main propositions and dictionary. – Moscow, Standart's Publishing House, 2001.
5. Portnova, I. M. Quantitative assessment

4. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

5. Портнова, И. М. Количественное оценивание качества продукции в радиоэлектронной аппаратуре (модемы): Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.23.02. - Пенза, ПГТА.- 2005. - 190 с.

6. Ефремова, М. Р. Общая теория статистики. 2-е издание./ М. Р. Ефремова, Е. В. Петрова, В. Н. Румянцев. - М.: ИНФРА-М., 1999 г.

7. Основы оценивания качества продукции./ Учебное пособие под ред. д.т.н., профессора В. В. Рыжакова. - Пенза, ПТИ. - 2001.

8. РМГ 29-99. Метрология. Основные термины и определения.

9. Рыжаков, В.В., Рыжаков М.В., Рыжаков К.В. Исследование метрологических характеристик алгоритмов измерения качества продукции./ В. В. Рыжаков, М. В. Рыжаков, К. В. Рыжаков // Метрология, приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». - 2005, №3. - С. 11-20.

of product quality in radioelectronic equipment (modems): Candidate of Technical Science dissertation, speciality 05.23.02 – Penza, Penza State Technological Academy, 2005 – 190 pp.

6. Yefremova, M. R., Petrova, Ye. V., Rumyantsev, V. N. General theory of statistics. Second edition. Moscow, INFRA-M, 1999.

7. Foundations of product quality assessment. Teaching aid edited by Doctor of Technical Science, professor V. V. Ryzhakov – Penza, Penza – 2001.

8. Metrology. Main terms and definitions.

9. Ryzhakov, V. V., Ryzhakov M. V., Ryzhakov K. V. // Analysis of metrological characteristics of product quality measuring algorithms. Metrology, supplement to scientific and technical journal "Izmeritelnaya Tekhnika" (Measuring Equipment), 2005 – No. 3 – pp. 11-20.

METHOD OF CHOOSING ALGORITHMS FOR ASSESSING THE DEGREE OF CORRESPONDENCE OF OBJECTS TO THEIR FUNCTIONAL PURPOSE WITH REGARD TO THEIR EFFICIENCY AND METROLOGICAL CHARACTERISTICS

© 2008 V. V. Ryzhakov¹, M. V. Kuznetsova¹, M. V. Ryzhakov²

¹Penza State Technological Academy

²Moscow Physico-Technical Institute (State University), Dolgoprudny, Moscow Region

The concept of algorithm is analysed. A method of choosing algorithms on the basis of dispersion analysis is proposed and considered as a method of assessing metrological characteristics of algorithms of the degree of object correspondence to functional purpose. Various algorithms are examined.

Metrological characteristics, algorithm, degree of correspondence, quality, dispersion, product, object.

Информация об авторах

Рыжаков Виктор Васильевич, заведующий кафедрой «Техническое управление качеством», Пензенская государственная технологическая академия.

Кузнецова Марина Владимировна, начальник отдела научных исследований, Пензенская государственная технологическая академия, аспирантка.

Рыжаков Михаил Викторович, старший преподаватель Московского физико-технического института (государственного университета), г. Долгопрудный Московской области.

Ryzhakov, Viktor Vassilyevitch, head of department “Technical quality management”, Penza State Technological Academy, Penza, Doctor of Technical Science, professor.

Kuznetsova, Marina Vladimirovna, head of research department, Penza State Technological Academy, post-graduate student.

Ryzhakov, Mikhail Viktorovitch, senior teacher of Moscow Physico-Technical Institute (State University), Dolgoprudny, Moscow Region.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛЬНОСТИ И РАЗМЕРНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ДОКУМЕНТООБОРОТА

© 2008 И. Н. Хаймович

Международный институт рынка

Рассмотрены вопросы автоматизации систем документооборота на этапе анализа промышленной предметной области. Представлены статистические исследования для обоснования количественных характеристик при проектировании концептуальной модели данных.

Система документооборота, сущности предметной области, общесистемные сущности, информационная составляющая, функциональная составляющая

На сегодняшний день существует острая потребность в научно обоснованных технологических методах разработки программных систем документирования производственных процессов, позволяющих планировать параметры программного проекта и гарантировать необходимое качество результатов. Большая размерность и сложность объектов автоматизации промышленной сферы предопределяет итерационный характер методов разработки, а потребность в разработке универсальных алгоритмов для промышленного использования означает необходимость глубокой формализации технологии выполнения всех этапов проекта. Существующие сегодня методы, безусловно, решают задачу разработки программного обеспечения, однако не обладают автоматическими свойствами, особенно при коллективном характере формирования модели данных промышленной предметной области.

Для создания научно обоснованных технологических методов коллективной разработки программных систем, которая является актуальной научно-технической проблемой, требуется провести анализ предметной области, важнейшей составной частью которого является моделирование предметной области.

Промышленная предметная область имеет большую сложность и размерность элементов, участвующих в документообороте. Чтобы уменьшить эти величины, а также сроки проектирования, требуется на этапе

анализа предметной области использовать не все элементы, а лишь значимые, то есть меньшие определенного коэффициента. Надо определить коэффициент минимального использования элементов для указанной предметной области.

Проведём исследование характеристик стабильности и размерности промышленной предметной области для выявления общих тенденций при моделировании данных в системах документооборота производственных процессов. В результате анализа используем следующие понятия:

- функциональная составляющая (аспект) предметной области – это совокупность основных функциональных элементов модели предметной области (процессов) вместе с их спецификациями;

- информационная составляющая (аспект) предметной области – это совокупность основных информационных элементов модели предметной области (сущностей предметной области) вместе с их спецификациями.

Под размерностью K составляющей предметной области понимается величина, характеризующая количество элементов, образующих совокупность, соответствующую данной составляющей. Эти понятия используются по аналогии с банковской предметной областью [1].

Под стабильностью составляющей предметной области в данном исследовании понимается величина, обратная коэффициенту изменения состава и/или содержания дан-

ной составляющей за какой-либо период времени.

Стабильность исследуем по формуле

$$S(t) = 1 / K(t), \quad (1)$$

где $S(t)$ – стабильность какой-либо составляющей предметной области за период времени t ; $K(t)$ – коэффициент изменения состава какой-либо составляющей предметной области за период времени t .

При этом

$$K(t) = 1 + \sum_{j=1}^R n_j(t) / R, \quad (2)$$

где $n_j(t)$ – количество изменений j -го элемента за период t ; R – количество элементов какой-либо составляющей.

Изменение K может быть объективным за счёт появления новых бизнес-процессов или сущностей в предметной области или субъективным за счёт уточнения существующих процессов.

Из (2) следует, что $K(t) \geq 1$. Поэтому из (1) следует область значений $S(t)$: $0 < S(t) \leq 1$.

Проведённое исследование размерности промышленной предметной области (таблица 1) показывает, что информационная составляющая намного больше функциональной.

Проведённое исследование стабильности промышленной предметной области (таблица 2) показывает, что стабильность инфор-

мационной составляющей больше функциональной.

Для моделирования информационной составляющей системы документооборота предприятия определяем коэффициент минимального использования информационных сущностей K_{min} .

Большой разброс в абсолютных значениях составляющих объясняется различиями в периоде измерений и в области применения версии модели предметной области, используемой для расчета.

Различия в абсолютном времени периода измерений оказывают существенное влияние на характеристики за счёт разницы в состоянии экономической среды России и темпах её изменений. Например, период измерений проекта по созданию системы документооборота для ОАО «Волгабурмаш» приходится на 2002 г., для которого характерна конкурентная борьба и отсутствие стабильности, появление новых изделий и операций и т. д. В отличие от ОАО «Волгабурмаш» период измерений информационных проектов для предприятий «Авиакор» и «Металлург» приходится на 2005-2006 гг., характеризующиеся относительной стабильностью экономики России. Источником большинства изменений в промышленных технологиях данного периода были сами предприятия, оптимизировавшие свои бизнес-процессы в условиях конкурентной борьбы.

Таблица 1. Исследование размерности промышленной предметной области

Предприятие	Размерность составляющей	
	функциональной R_{ϕ}	информационной R_u
Волгабурмаш	14	302
Металлург	59	416
Авиакор	16	167

Таблица 2. Исследование стабильности промышленной предметной области

Предприятие	Стабильность составляющей	
	функциональной S_{ϕ}	информационной S_u
Волгабурмаш	0,54	0,73
Металлург	0,71	0,78
Авиакор	0,61	0,97

Различия в области применения внедрённых систем документооборота также оказывают существенное влияние на абсолютные показатели стабильности исследуемых участков предметной области. Например, основная функциональность ОАО «Волгабурмаш» в измеряемый период была сосредоточена на уровне заказчиков и поставщиков предприятия, в отличие от других предприятий, чья функциональность преимущественно была сосредоточена на уровне одного предприятия.

Таким образом, в результате проведённых исследований показано, что в промышленной предметной области информационная составляющая является более стабильной и имеет большую размерность по сравнению с функциональной составляющей, что подтверждает целесообразность выявления интегрирующей основы предметной области именно в информационном аспекте. Эта выявленная тенденция не соответствует банковской предметной области, где информационная составляющая значительно меньше функциональной.

Исследуем характеристики сцепления бизнес-процессов по информационным суц-

ностям, т. е. связь сущностей и процессов, по следующей методике:

- определение характеристик связи бизнес-процессов и их зависимости от распределения сущностей по коэффициентам использования;

- оценка значения коэффициента минимального использования сущностей (K_{min}) в промышленной предметной области.

Для расчёта количественных характеристик связи бизнес-процессов по информационным сущностям введём относительную величину - коэффициент информационной связи функциональной модели (Kc):

$$Kc = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N Mp_{ij} * 2 / N(N-1), \quad (3)$$

где Mp_{ij} – количество общих информационных сущностей предметной области (СПО) у пары (i, j) бизнес-процессов функциональной модели; N – количество бизнес-процессов в функциональной модели; $N(N-1)/2$ – количество пар бизнес-процессов.

Результаты исследования СПО и общесистемных сущностей предметной области, вычисленные с использованием K_{min} , показаны в таблице 3.

Таблица 3. Статистическое исследование сущностей предметной области и общесистемных сущностей (ОСПО)

Характеристика	Волгабурмаш	Металлург	Авиакор
Количество бизнес - процессов	16	11	13
СПО	175	51	97
ОСПО	25	18	12
Kc (с учетом СПО)	9,44	4,06	8,14
Kc (без учета ОСПО)	1,44	2,04	2,52

Коэффициент использования i -й СПО рассчитывается следующим образом:

$$Ki = Ri / N, \quad (4)$$

где N – количество бизнес-процессов в функциональной модели; Ri – количество бизнес-процессов, с которыми связана i -я СПО.

На рисунке 1 количеству СПО соответствует площадь под кривой на выбранном

интервале значений коэффициентов использования.

Рисунок 1 показывает, что область второго локального экстремума, соответствующего требуемому количеству СПО с высокими значениями коэффициента использования, находится в интервале $(0,55 - 1,0)$.

Для определения влияния характеристик использования сущностей на коэффици-

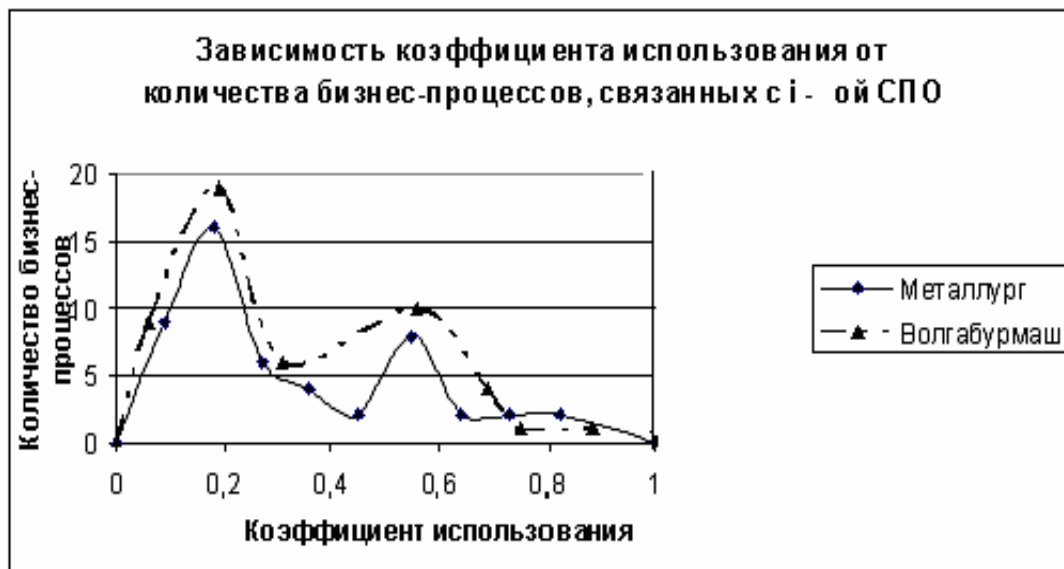


Рис. 1. Исследование коэффициента использования при проектировании концептуальной модели данных (КМД)

ент сцепления функциональной модели построим график функции (рис. 2):

$$K_c = f(N), \quad (5)$$

где N – количество сущностей в процентах от общего их числа; K_c – коэффициент информационной связи функциональной модели.

Участок заметного понижения кривых (рис. 2) соответствует количеству ОСПО около 35 % от общего числа сущностей, что позволяет выявить наиболее эффективное значение коэффициента минимального использования ОСПО (K_{min}) в промышленной предметной области.

Таким образом, результаты проведённого исследования показали:

- в промышленной предметной области существует небольшая доля информационных сущностей (менее 35 %), связанных с большинством (около 55 %) бизнес-процессов, что позволяет выявлять общесистемные сущности и понижать размерность концептуальной модели данных при первой итерации моделирования предметной области;

- в промышленной предметной области целесообразно выявлять ОСПО на основе значения K_{min} , равного 0,55.

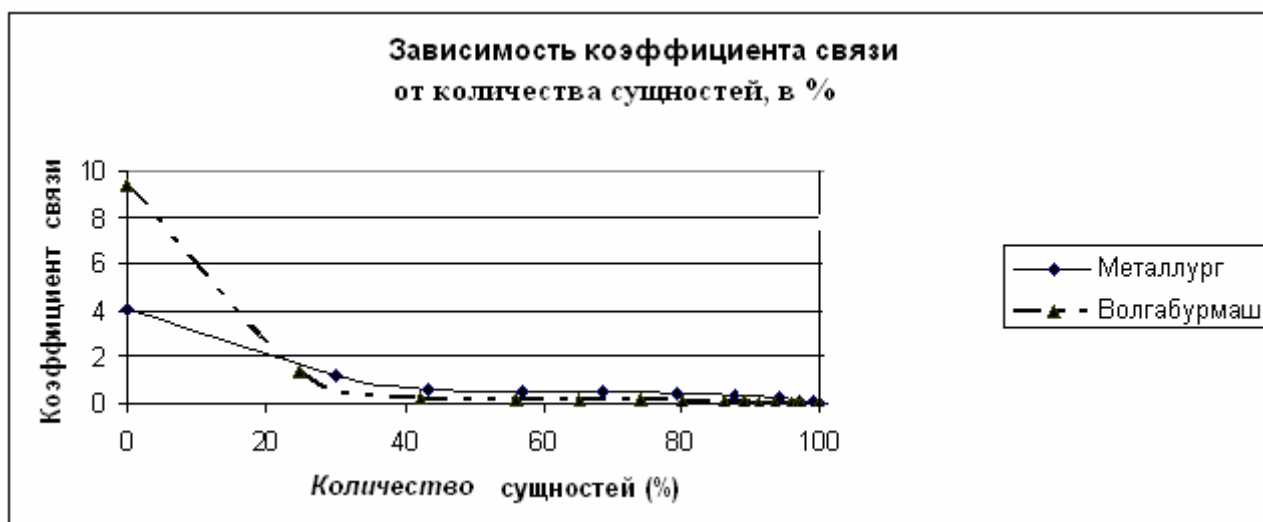


Рис. 2. Исследование коэффициента связи

Библиографический список

1. Тудер И. Ю. Новые подходы к автоматизации банка // Банковские технологии. - М: «Бизнес и компьютер», № 2, 1998.

References

Tuder I. Yu. New approaches to bank automatization // Bank technologies. Moscow: «Business and Computer», No. 2, 1998.

**ANALYSIS OF INDUSTRIAL SUBJECT AREA STABILITY
AND DIMENSIONALITY CHARACTERISTICS USING AUTOMATED
SYSTEMS OF DOCUMENT TURNOVER**

© 2008 I. N. Khaimovitch

International Market Institute

The paper deals with the questions of automatization of document turnover systems at the stage of analyzing industrial subject area. Statistical studies substantiating quantitative characteristics in designing a conceptual data model are presented.

Document turnover system, subject area principles, general system principles, information constituent, functional constituent

Информация об авторах

Хаймович Ирина Николаевна, доцент, кандидат технических наук, Международный институт рынка, доцент кафедры обработки металлов давлением СГАУ, специалист в области организации производства (в машиностроении) и информационных технологий.

Khaimovitch Irina Nikolayevna, Associate Professor, Candidate of Technical Science, International Market Institute, Associate Professor of Pressure Working of Metals Department, SSAU, specialist in the area of production organization (in machine building) and information technologies.

ПРОЦЕДУРНЫЕ ПРАВИЛА РАЗРАБОТКИ И СОГЛАСОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2008 И. Н. Хаймович¹, А. И. Хаймович²

¹Международный институт рынка

²Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены вопросы автоматизации моделей базовых бизнес-процессов конструкторско-технологической подготовки кузнечно-штамповочного производства и показаны пути сокращения времени технологической подготовки производства за счет использования информатизации документооборота производственных процессов. Предложено использование ресурсно-ориентированного подхода при моделировании промышленной предметной области, определен необходимый признак декомпозиции функциональной модели на основании статуса документов, определены шаблоны моделей данных.

Бизнес-процесс, конструкторско-технологическая подготовка производства, кузнечно-штамповочное производство, жизненный цикл документов

Разработка и согласование бизнес-процессов (БП) проводится для реинжиниринга этих процессов, который состоит в оптимизации системы документооборота конструкторско-технологической подготовки в области кузнечно-штамповочного производства (КТПП КШП), а также в моделировании структурной реорганизации.

Для удобства моделирования существующих БП будем использовать следующее его определение: бизнес-процесс – это операция, включенная в систему операций, целью которой является производство и поставка услуг/товаров с использованием собственных и предоставляемых ей ресурсов операциям, входящим в систему, а также другим системам.

Приведенное определение свидетельствует о том, что БП в силу свойств понятия «операция» всегда может быть описан математической моделью – целевым функционалом и множеством ограничений, что является важнейшим условием для постановки задачи глобальной оптимизации управления ресурсами различного рода.

Для формирования модели БП требуется проведение декомпозиции существующих процессов производства до суммы моделей:

- функциональной модели (ФМ), представляющей детальную систему функций документооборота КТПП КШП, связанных между собой отношениями, через объекты

(документы КТПП с их жизненным циклом - ЖЦ) системы;

- модели данных (документов) (МДД) дуальны к ФМ и представляют собой описание объектов (документов), связанных с системными функциями;

- модель информационных ресурсов (МИР) – интерпретация ФМ в спецификации [ресурс (исполнитель) / ресурс (информационная система) «перечень системных функций «Работа»] с привязкой к рабочим местам автоматизированной системы (АС) КТПП КШП;

- информационная модель данных (ИМД) – структурированная модель объектов АС документооборота КТПП КШП в терминах классов, связанных между собой отношениями полного порядка и отношениями соответствия.

Поскольку объектом моделирования КТПП КШП является документооборот, то ФМ строится на основе документоориентированного подхода к описанию процесса в IDEF0 – нотации. Требуется определить ограничения на интерпретацию исходных примитивов этого стандарта, т.к. это необходимо для процедуры проверки адекватности ФМ.

Предлагается использовать вместо классического подхода в IDEF0 – методологии (рис.1, А) ресурсно-ориентированный



Рис. 1. Общая модель бизнес-процесса

подход (рис. 1, В) [1]. В этом случае в ФМ будут задействованы «Работы», т.е. действия или функции, преобразующие элементы «Ресурсы».

Конкретизация IDEF0 – нотации моделирования БП состоит в следующем:

- все «Работы» принадлежат одному классу, т.е. обладают одинаковым набором свойств и поведением. Основным критерий – набор действий над конкретным документом (комплект документов), составляющий его жизненный цикл;

- все связи между «Работами» относятся к классу «Ресурс». Используются, главным образом, информационные ресурсы – документы, функционирующие в среде КТПП КШП.

Для однозначной «привязки» ресурсов к трём возможным входам БП на множестве «Ресурсов» вводится следующая классификация:

1. Признак изменчивости «Ресурса» при исполнении «Работы».

1.1. «Ресурсы», подлежащие трансформации (изменяемые в процессе выполнения «Работы») - рабочие документы, подлежащие изменению в соответствии с их ЖЦ.

1.2. Нетрансформируемые «ресурсы».

1.2.1. Неизменяемые «Ресурсы» - регламентирующая и распорядительная документация, архивная документация, не изменяемая в рамках данной «Работы».

1.2.2. Пополняемые «Ресурсы» - персонал, САД/САМ/САЕ и информационные системы и базы (базы данных по операциям, оборудованию и т.д.).

2. Признак блокировки «Ресурса» «Работой», исключающий возможность использования «Ресурса» другими «Работами».

2.1. «Ресурсы», которые не могут блокироваться «Работами» («Ресурсы» общего

пользования). В данном случае неизменяемые информационные ресурсы по п. 1.2.1, допускающие тиражирование.

2.2. Блокируемые «Ресурсы». В основном, рабочие документы, находящиеся на соответствующих стадиях ЖЦ.

3. Признак начала выполнения «Работы».

3.1. Начало выполнения «Работы» инициируется событием «Поступление «Ресурса»». Необходимым, но не достаточным условием выполнения «Работы» является свершение полного набора событий «Поступление «Ресурса»», связанных с интерфейсами «Работы».

3.2. Безусловным инициирующим событием начала выполнения «Работы» является управляющее воздействие. Оно трактуется как управляющий документ (распоряжение, резолюция), пункт графика потока работ для информационной системы с задействованным функционалом управления потоком работ.

4. Признак завершения «Работы». Этим признаком является смена атрибутов статуса трансформируемых ресурсов – изменяемых рабочих документов.

Понятие статуса документа трактуется как совокупность атрибутов, однозначно определяющих фазу ЖЦ документа.

Пусть D_i – документ в ФМ или МДД. Тогда атрибутами документа являются элементы жизненного цикла документа:

$$\{a_{di}\} = \{P, И, У, Д, Д_{\kappa}, А\},$$

где P – документ на разработке, $И$ – документ на изменении, $У$ – документ на согласовании и/или утверждении, $Д$ – действующий документ, $Д_{\kappa}$ – наличие копии действующего документа, предназначенной для внесения изменений, $А$ – аннулирование.

Отношения соответствия для документа D_i определим через флаги состояний: 0 – документ не принадлежит элементу ЖЦ, 1 – документ принадлежит элементу ЖЦ. Обозначим соответствия как статусы документа.

Обобщенно статус S документа D_i определяется как

$$C(D_i) = \begin{cases} P(0 \wedge 1) \\ И(0 \wedge 1) \\ У(0 \wedge 1) \\ Д(0 \wedge 1) \\ Д_{\kappa}(0 \wedge 1) \\ А(0 \wedge 1) \end{cases}, \quad (1)$$

где значения «0» и «1» описывают флаги состояний, т.е. атрибут статуса или «задействован» или «не задействован».

Из всех возможных статусов документа значимыми являются следующие:

«Разработка» - $C1(D_i) \Leftrightarrow (P=1, И=У=Д=Д_{\kappa}=А=0)$; сокращенно ($P=1$);

«Внесение изменений в рабочий (не утвержденный) документ» - $C2(D_i) \Leftrightarrow (P=1, И=1, У=Д=Д_{\kappa}=А=0)$; сокращенно ($P=1, И=1$);

«Утверждение нового документа» - $C3(D_i) \Leftrightarrow (P=1, У=1, Д=Д_{\kappa}=А=0)$; сокращенно ($У=1$);

«Ввод в действие документа (помещение в архив)» - $C4(D_i) \Leftrightarrow (У=1, Д=1, И=Д_{\kappa}=А=0)$; сокращенно ($Д=1$);

«Внесение изменений в действующий документ» - $C5(D_i) \Leftrightarrow (Д=1, И=1, Д_{\kappa}=А=0)$;

«Редактирование (изменение) документа на базе новой версии документа» - $C6(D_i) \Leftrightarrow (Д_{\kappa}=1, И=1, У=0, А=0)$;

«Утверждение новой версии документа» - $C7(D_i) \Leftrightarrow (Д_{\kappa}=1, И=1, У=1, А=0)$;

«Утверждение изменений в действующем документе» - $C8(D_i) \Leftrightarrow (Д=1, И=1, У=1, Д_{\kappa}=А=0)$;

«Отработка (ввод в действие) изменений в действующем документе» - $C9(D_i) \Leftrightarrow (Д_{\kappa}=1, И=1, У=1, А=1, Д=0)$;

«Ввод в действие новой версии документа, исходный документ аннулируется» - $C10(D_i) \Leftrightarrow (Д_{\kappa}=1, У=1, А=1, Д=И=0)$.

В этих обозначениях признак необходимости декомпозиции функциональной модели заключается в следующем: рабочий документ D_i , выходящий из блока «функция», должен иметь один из перечисленных выше статусов: $C1(D_i) \dots C10(D_i)$.

На основе ФМ строятся модели данных документов (МДД), которые представляют собой записанную в табличной форме последовательность смены статуса ЖЦ документа (табл. 1).

Таблица 1. Шаблон моделей данных документов

Обозначение диаграммы по IDEF0		Наименование работы 1 по IDEF0 Шифр работы по IDEF0	Наименование работы N по IDEF0 Шифр работы по IDEF0
		Список информационных ресурсов		Список информационных ресурсов
		Исполнители	Исполнители
Наименование документа	Обозначение (код в соответствии с реестром документов)	Статус документа (C1....C10)		Статус документа (C1....C10)

Пример заполнения МДД для КТПП КШП Самарского металлургического завода «Металлург» приведён в таблице 2.

В таблице 2 используются обозначения: КД – конструкторская документация, ММ –

математическая модель, КО – конструкторский отдел, ТО – технологический отдел, диаграммы по IDEF0 с шифрами и наименованиями поступают из функциональной модели.

Таблица 2. Пример заполненного шаблона модели данных документов

Проектирование инструмента (оснастки, приспособлений) Узел А3		Разработка КД на инструмент (оснастку, приспособления) А3.2	Согласование и утверждение КД на инструмент (оснастку, приспособления) А3.3	Хранение и рассылка КД на инструмент (оснастку, приспособления) А3.4
		ММ (инструмента, оснастки)		
		КО	ТО, КО, ц. 52	КО
КД на инструмент, оснастку	А3.2/1	С1	С3 или С2, С3	С4

По ФМ и МДД строится информационная модель данных на основе UML – моделей диаграмм классов с указанием их атрибутов.

Таким образом, удаётся смоделировать бизнес-процессы КТПП КШП для создания

единого информационного пространства. Модели являются удобным средством для проведения реинжиниринга БП в плане оптимизации системы документооборота и структурной реорганизации.

Библиографический список

С. Рубцов. Секреты моделирования и разработки бизнес-процессов// Открытые системы. - 2003, № 1. - С. 53-56.

References

S. Rubtcov. Secrets of modeling and developing business processes // Open systems. 2003, No. 1, pp. 53-56.

PROCEDURE RULES OF PRESS FORGING BUSINESS PROCESS DEVELOPMENT AND COORDINATION

© 2008 I. N. Khaimovitch¹, A. I. Khaimovitch²

¹International Market Institute

²Samara State Aerospace University

The paper deals with the question automatization of models of basic business processes of press forging design-and-technological preparation. Ways of reducing the time of technological preparation of production due to the use of computer-aided document turnover in production processes are shown. The use of a resource-oriented approach for the modeling of industrial subject area is proposed, the required functional model decomposition indicator is defined on the basis of document status, data model patterns are specified.

Business process, design-and-technological preparation of production, press forging, document life cycle

Информация об авторах

Хаймович Ирина Николаевна, доцент, кандидат технических наук, Международный институт рынка, доцент кафедры обработки металлов давлением СГАУ, специалист в области организации производства (в машиностроении) и информационных технологий.

Хаймович Александр Исаакович, ассистент кафедры производства двигателей летательных аппаратов СГАУ, кандидат технических наук.

Khaimovitch Irina Nikolayevna, Associate Professor, Candidate of Technical Science, International Market Institute, Associate Professor of Pressure Working of Metals Department, SSAU, specialist in the area of production organization (in machine building) and information technologies.

Khaimovitch Alexander Isaakovitch, Assistant of Aircraft Engine Construction Department, SSAU, Candidate of Technical Science.

БКК ТЗ(2Р-4Ку)+УОЗ(2)+У9(2Р-4Ку)30

ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ В 1971-1975 г.г.

© 2008 А. В. Придаткин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматриваются формы и методы вовлечения инженерно-технических работников и рабочих в техническое творчество, в рационализаторское и изобретательное движение в 70-е годы XX века на машиностроительных предприятиях Среднего Поволжья.

Научно-техническая революция, техническое творчество рабочих, движение рационализаторов и изобретателей, промышленные предприятия Среднего Поволжья

Научно-техническая революция (НТР), начавшаяся в середине XX века, диктовала необходимость коренного обновления технического фундамента экономики за счёт комплексной механизации и автоматизации промышленного производства как необходимого условия его интенсификации и повышения эффективности общественного производства в целом.

В условиях развёртывания НТР возрастает значение человеческого фактора. Важнейшим условием реализации её целей и задач становится активное участие в совершенствовании техники всех работников производства. Особенно большое значение приобретает техническое творчество рабочих, руками которых воплощаются в металл технические разработки инженерно-технических работников (ИТР). Именно рабочие становятся первыми испытателями новейших образцов машин и механизмов, оценивают их достоинства и недостатки.

Ведущей формой технического творчества работников промышленности в исследуемый период оставалось движение рационализаторов и изобретателей. С середины 30-х годов XX века, когда оно получило государственную поддержку и организационные формы, промышленными предприятиями (машиностроительными в частности) Среднего Поволжья был накоплен ценный опыт системного использования творческой активности тружеников индустрии, их технических знаний, производственной смекалки и опыта для решения производственных задач.

Особенно усложнились они в связи с наметившимся поворотом промышленного производства к интенсивным факторам развития. Приоритетное значение приобретали качественные характеристики хозяйственной деятельности, а также уровень организаторской работы в трудовых коллективах, в частности, совершенствование деятельности заводских организаций Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов (ВОИР), научно-технического общества (НТО) и других.

С самого начала девятой пятилетки усилили внимание вопросам рационализации и изобретательства общественные организации. Ульяновский обком КПСС восемь раз за годы пятилетки рассматривал эти вопросы, причем дважды на своих пленарных заседаниях. Эти вопросы не сходили с повестки дня городских комитетов КПСС, парткомов Ульяновского автозавода (УАЗ), Волжского автозавода (ВАЗ), Куйбышевских Четвертого подшипникового, авиационного заводов, завода «Пензтекстильмаш», Сызранского завода «Тяжмаш» и многих других. Заметно усилили в этой пятилетке работу с молодыми рационализаторами и изобретателями комсомольские организации.

Первоочередное внимание руководство машиностроительных предприятий и общественных организаций уделяло пропаганде значения технического прогресса, рационализации и изобретательства, опыта и достижений заводских умельцев, созданию необходимых условий для их успешной деятель-

ности, а также в организации оформления технической документации рабочим-рационализаторам, проведении экспериментальных работ, изготовлении опытных образцов новых или модернизированных промышленных изделий.

Важнейшее место в пропаганде значимости технического прогресса, широкого участия машиностроителей, особенно рабочих в техническом совершенствовании производства, отводилось средствам массовой информации. Областные и городские газеты регулярно информировали читателей о планах и мероприятиях предприятий машиностроения по совершенствованию техники и технологии промышленного производства, об итогах этой работы, достижениях заводских умельцев. Редкий номер многотиражной газеты Волжского автозавода «Автостроитель» не содержал бы материалов по технической тематике, о делах и нуждах заводских рационализаторов. Широко отражали техническую проблематику на своих страницах многотиражки Куйбышевского завода им. М. В. Фрунзе «Моторостроитель», ГПЗ-4 - «Красное Знамя», Ульяновского моторного завода и других.

Многотиражные газеты рассказывали не только о достижениях, об опыте лучших рационализаторов, но и публиковали чертежи некоторых технических новинок, заслуживавших широкого применения в производстве.

Систематически выступали на страницах газет со статьями аналитического характера руководители общественных организаций машиностроительных предприятий и их подразделений, заводские экономисты. Главное внимание в этих статьях уделялось анализу недостатков в организации массового технического творчества машиностроителей, выяснению причин, тормозивших его развитие, выполнению планов технического перевооружения предприятий.

Большую роль в развитии интереса машиностроителей к техническому творчеству, обобщении опыта и достижений поборников технического прогресса играло местное радиовещание. Опытной своей работой над модернизацией техники, улучшением техноло-

гии делились со слушателями победители соревнования рационализаторов и изобретателей, руководители заводских организаций ВОИР и НТО, технико-экономических советов и советов новаторов и др. Работники Куйбышевского радиовещания помимо отдельных передач на технические темы один раз в месяц (а иногда и дважды) транслировали лекции и беседы из специального цикла передач, посвященного рационализации и изобретательству.

Пропаганде технического творчества неизменно придавали первостепенное значение на самих машиностроительных заводах их администрация, руководители заводских служб и цехов, общественные организации. Применялись различные формы и средства пропаганды, рационализации и изобретательства: информации о конкретных задачах, основных направлениях, средствах экономической эффективности модернизации оборудования, приборов и инструментов, внедрении технических новшеств: общецеховые и заводские выставки и стенды, фотомонтажи, номера стенгазет, посвященные рационализации и изобретательству (в некоторых цехах Волжского автозавода выпускались специальные стенные газеты «Рационализатор и изобретатель»), листовки, плакаты, лозунги и т.п. Вопросы технического совершенствования производства обсуждались и на цеховых (участковых), и на бригадных рабочих собраниях. На некоторых предприятиях, например Пензенском заводе им. М.В.Фрунзе, проводились дни рационализатора, устраивались чествования лучших рационализаторов.

Эти и другие меры при всех недостатках (например, компанейщине, элементах формализма), бесспорно, занимали важное место среди факторов роста массового технического творчества тружеников индустрии. При умелом их использовании в рабочих коллективах создавалась атмосфера технического поиска, техническая смекалка становилась необходимым элементом творческого труда рабочего.

В девятой пятилетке применялись более разнообразные, чем прежде, формы и методы руководства движением рационали-

заторов и изобретателей, стимулирования массового технического творчества машиностроителей. Значительно оживилась деятельность заводских организаций ВОИР и НТО, вырос их численный и качественный состав. Так, численность членов ВОИР на промышленных предприятиях Куйбышевской области выросла за девятую пятилетку почти на 61 тысячу человек и достигла к концу ее 192500 человек [1]. Организация НТО Волжского автомобильного завода в 1975 г. насчитывала в своих рядах 4500 человек, в 5 раз больше, чем в 1971 г. [2].

Организациями НТО Куйбышевской области только за первые годы девятой пятилетки было проведено более 1300 различных конкурсов, 4700 научно-технических конференций и тематических выставок, собрано около 50 тысяч предложений, 30900 из них были реализованы с экономическим эффектом в 55 млн. рублей [3].

На промышленных предприятиях Ульяновской области в 1971 г. действовало 185 первичных организациях ВОИР, объединявших 25650 человек, в их числе 13953 рабочих. К концу пятилетки численность участников возросла до 210334 человек, из них рабочих 18582 [4].

Организации ВОИР и НТО осваивали новые формы разъяснительной и организаторской работы в заводских коллективах. Они выступали инициаторами мероприятий, ориентированных на широкое вовлечение заводчан в движение за технический прогресс. При их участии и поддержке на предприятиях были созданы новые самостоятельные организации, объединявшие десятки тысяч энтузиастов технического творчества: общественные конструкторские и патентные бюро, клубы технического творчества, университеты технического прогресса и др.

Удачной и потому, вероятно, наиболее распространенной в этот период формой приобщения НТР и рабочих к техническому творчеству были общественные конструкторские бюро (ОКБ). Их численность и членство в них постоянно возрастали. На промышленных предприятиях Ульяновской области в 1973 году насчитывалось 146 ОКБ [5]. На предприятиях Куйбышевской области за годы

пятилетки было создано более 200 ОКБ, а к началу десятой пятилетки их уже насчитывалось свыше 400, объединявших почти 4 тысячи конструкторов-общественников [6]. Они играли большую роль в оперативной разработке и внедрении постоянно возрастающего потока технических предложений, решении проблем реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий, пропагандировали технические знания среди рабочих.

Члены ОКБ Ульяновского производственного объединения «АвтоУАЗ» в 1971 г. прочитали в заводских цехах более 200 лекций на технические темы преимущественно для молодых рабочих, проводили индивидуальные беседы со многими из них, оказывали начинающим рационализаторам помощь в техническом поиске и подготовке необходимой к рацпредложениям документации. За один этот год 114 молодых рабочих объединения стали членами ВОИР. В 1972 г. в первичных организациях ВОИР состояло более трети молодых рабочих объединения [7].

Предметом особой заботы руководства машиностроительных предприятий, руководителей заводских организаций ВОИР, НТО и других общественных организаций было эффективное использование растущего творческого потенциала ИТР и рабочих, вовлечение всех изъявивших интерес к «секретам» техники и технологии в активный творческий поиск решений научно-технических задач. Важно было держать в трудовых коллективах постоянный творческий настрой и напряжение. В целях его стимулирования проводились общественные смотры рационализации и изобретательства, научно-технические конференции, межзаводские переключки новаторов производства, различные формы соревнований между ними.

Большое внимание уделялось организации смотров-конкурсов. Они помогали объединять усилия различных организаций, концентрировать их на решение узловых технических проблем, обеспечивали комплексный подход к их решениям. При соответствующей подготовке смотры-конкурсы давали значительные производственные и экономические результаты.

На Куйбышевском девятом подшипниковом заводе в основном производстве за счет механизации и частичной автоматизации были достигнуты неплохие показатели: из месяца в месяц увеличивался выпуск подшипников, вырос их ассортимент, потребительские качества. Однако эффективность производства (стоимость продукции, использование основных фондов и др.) росла медленно, автоматизация не давала должной отдачи. Техничко-экономический анализ, проведенный специалистами завода, выявил главные причины, тормозившие рост эффективности производства: в процессе механизации производства не выдерживался комплексный подход, механизация практически не коснулась вспомогательных цехов, где более 3 тысяч рабочих были заняты ручным трудом. После тщательной подготовки был проведен смотр-конкурс на лучшее производство по механизации вспомогательных работ. За короткий срок в смотровые комиссии поступило свыше 2,5 тысяч предложений на заданную тему. Более трети из них было реализовано уже в ходе смотра. А в целом итоги смотра были очень убедительны – за один 1972 год более двух тысяч рабочих были переведены на механизированный труд [8].

Тематический смотр-конкурс, проведенный в феврале-марте 1975 г. на Ульяновском моторном заводе, помог внести существенные коррективы в работу заводских служб, отвечавших за организацию труда, обеспечение рабочих мест, и сэкономить в расчете на год без малого 300 тыс. рублей [9].

Такие примеры не единичны. С большой активностью участников, высокими результатами проходили на машиностроительных предприятиях мероприятия по мобилизации творческого потенциала рабочей молодежи в рамках Всесоюзного смотра научно-технического творчества молодежи (НТТМ). В ходе смотра на заводах были созданы советы, отряды НТТМ, школы и кружки технической и экономической учебы рабочей молодежи, организованы внутризаводские и межзаводские соревнования молодых рационализаторов и изобретателей. Тысячи молодых производственников влились в состав заводских организаций ВОИР и НТО, значи-

тельно (от 30 до 40 %) вырос удельный вес молодежи в рядах новаторов производства, вырос уровень их технической и экономической грамотности.

Рабочая молодежь предприятий машиностроительной промышленности Среднего Поволжья внесла весомый вклад в развитие массового технического творчества, в совершенствование техники и технологии промышленного производства. Более 120 тысяч молодых рабочих Средневолжского региона участвовали в смотре НТТМ в 1971-1975 годы. Они внесли около 140 тысяч рационализаторских предложений и изобретений с условно-годовой экономией в размере около 53 млн. рублей. Свыше 90 % рационализаторских предложений и изобретений приходится на долю молодых машиностроителей [10].

Особенно большой вклад в общезаводскую копилку внесли молодые рационализаторы ведущих предприятий машиностроения. Только за 1974-й год их численность на Куйбышевском 4 ГПЗ возросла вдвое, с 19 до 30 % к общему числу рационализаторов на заводе: на 55 % больше, чем в 1973 году поступило зарегистрированных предложений и изобретений [11].

С большим подъемом и организованно прошли все три этапа Всесоюзного смотра НТТМ на Ульяновском заводе тяжелых и уникальных станков. Целенаправленно вели здесь работу с молодыми четыре секции в составе заводского Совета НТТМ: пропаганды технических заданий, организации учебы молодых рационализаторов, организации соревнования между ними, учета и внедрения рацпредложений. Совет применял различные формы стимулирования творческой активности молодежи: средства наглядной агитации, выставки и стенды, вечера и эстафеты молодых рационализаторов, конкурсы на звание «Лучший молодой рационализатор», «Лучший комсомольско-молодежный коллектив по рационализации» и др. Все это позволило заметно повысить творческую активность молодых рабочих. Так, на заводе численность рабочих – членов ВОИР в возрасте до 30 лет выросла с 37 человек в 1971 г. до 126 человек в 1975 г., а предложений мо-

лодые рационализаторы внесли в 1975 г. почти в шесть раз больше, чем в первом году девятой пятилетки. Только 16 предложений, рекомендованных заводским техсоветом для первоочередной рационализации, сберегли заводу более 250 тысяч рублей [12].

Смотры НТТМ, бесспорно, сыграли большую роль в движении рационализаторов и изобретателей на многих других предприятиях машиностроения: Волжском автозаводе, Куйбышевских моторостроительном и авиационных заводах, Сызранском заводе «Тяжмаш» и др.

По подсчетам А. А. Зимины, количество рационализаторских предложений, собранных в 1975 г. на промышленных предприятиях средневожских областей, на 26,2 тысячи превысило соответствующий показатель в 1970 г., а экономический эффект вырос на 41,2 млн. рублей [13]. Только промышленные предприятия Куйбышевской области сэкономили за 5 лет девятой пятилетки за счет применения технических новшеств, предложенных рационализаторами 440 млн. рублей, на 204 млн. рублей больше, чем в восьмой пятилетке, и почти на 100 млн. рублей больше принимавшихся на пятилетие обязательств [14].

Основная задача в этом принадлежит, бесспорно, машиностроителям. Так, рационализаторы и изобретатели Волжского автозавода уже в 1971 году, в первом году освоения производства, подали свыше 3800 предложений. За год было реализовано около 1200 предложений и 12 изобретений. За 1971 год было сэкономлено 597 тонн черных и 150 тонн цветных металлов, 365 тысяч кВт/ч электроэнергии, более чем на 153 тысячи нормо-часов сократились трудовые затраты на производстве автомобиля, а расходы – почти на 2 млн. рублей [15].

Крупных успехов добились в девятой пятилетке также рационализаторы авиационного, моторостроительного, турбостроительного заводов Куйбышевской области, автомобильного и моторного заводов города Ульяновска, заводов «Пензтекстильмаш», «Куззтекстильмаш» Пензенской области и др.

В годы девятой пятилетки проходили и качественные изменения в самом движении

рационализаторов и изобретателей, в общеобразовательной подготовке и деловой квалификации их участников. Широкое распространение получили коллективные формы технического творчества, доказавшие высокую эффективность в решении крупных технических задач. Создание творческих бригад обеспечивало переход от стихийных эмпирически найденных, частичных усовершенствований – к глубоко осмысленному, планомерному, научно обоснованному и комплексному решению проблем технического совершенствования производства. Применение коллективных форм технического творчества давало возможность концентрировать усилия изобретателей и рационализаторов на решающих участках технического прогресса, устранять параллелизм в работе рационализаторов, значительно повысить эффективность их деятельности.

Помимо названных выше общественных конструкторских и патентных бюро и групп на многих предприятиях были созданы творческие бригады, объединявшие ИТР и рабочих. На Куйбышевском моторостроительном заводе в 1971 году было создано 86 таких бригад, объединивших 328 новаторов производства. За год они выполнили более 400 технических разработок с условной годовой экономией 1 млн. 750 тыс. рублей. В 1972 г. число таких бригад возросло до 122 [16].

Активно использовались коллективные формы решения технических задач на Куйбышевском 4 ГПЗ. Ежегодно на заводе действовало от 60 до 80 творческих бригад. В 1972 году 66 бригад сберегли своему предприятию свыше 400 тыс. рублей [17].

На Волжском автозаводе коллективные творческие бригады стали создаваться с самого начала освоения производственных мощностей. Их число за годы девятой пятилетки выросло почти в шесть раз, а экономическая отдача от их технических разработок составила более 36 % всей экономии, которую завод получил от рационализации и изобретательства [18]. В целом на средневожских промышленных предприятиях к концу девятой пятилетки действовало более 5 тыс. творческих комплексных бригад [19].

Эффективной формой творческого сотрудничества, также широко применявшейся в названный период на предприятиях машиностроения Средней Волги, стали договоры о техническом сотрудничестве, заключавшиеся между ИТР и рабочими. Они предусматривали объединение усилий в поисках конструктивных и практических решений актуальных технических задач – от проектирования до воплощения в металле технических новинок. Важной составляющей таких договоров была помощь ИТР рационализаторам-рабочим в вопросах материаловедения, технологии, оформлении технической документации.

Участие в рационализации производства и изобретательстве оказывало большое положительное влияние на всех участников движения за технический прогресс, но особенно важным оно было для рабочих. Для них это была школа повышения профессионального мастерства, общей технической культуры.

В годы девятой пятилетки тысячи и тысячи машиностроителей прошли через создавшиеся, по существу на общественных началах, курсы и школы экономики, университеты технического прогресса. На машиностроительных предприятиях Пензенской области в 1971 году действовало 46 университетов технического прогресса и передового опыта. В них прошли обучение свыше 10 тысяч человек, из них около 40 % - молодые рабочие в возрасте до 30 лет. Уже в 1972 году подавляющее большинство их них повысили на 1-2 пункта свои квалификационные разряды [20]. В Куйбышевской области на первом этапе смотра НТТМ было создано 1200 технических кружков для молодых производственников [21].

Особенно большим размахом и эффективностью отличалась организация учебы рационализаторов и изобретателей на Волжском автозаводе. Различными формами технической и экономической учебы здесь было охвачено (помимо обучавшихся с отрывом от производства) в 1973/1974 учебном году 20104 человек, а в 1974/1975 учебном году – 32544 человек, т.е. более половины занятых в основном производстве [22].

Вооружение рабочих техническими и экономическими знаниями способствовало, прежде всего, росту их творческой активности, заинтересованности в делах своей бригады, своего цеха, предприятия в целом, а вместе с этим изменялось содержание труда рабочего-рационализатора, в нем увеличилось значение интеллектуальных функций.

В годы девятой пятилетки сотни энтузиастов технического творчества предприятий машиностроения Среднего Поволжья были удостоены почётного звания «Заслуженный изобретатель», «Заслуженный рационализатор», награждены Дипломами ВДНХ, Почётными грамотами Государственного Комитета по делам открытий и изобретений при Совете Министров СССР и Центрального ВОИР, знаками «Отличник изобретательства и рационализации» и др. Только из числа рабочих и ИТР Волжского автозавода звания «Заслуженный рационализатор» и «Заслуженный изобретатель» были удостоены 98 человек [23].

В 1971-1975 годы средневожжский регион сделал крупный шаг в индустриальном развитии. Выпуск промышленной продукции за это время увеличился в Куйбышевской области на 71%, в Пензенской области более чем в 1,5 раза, в Ульяновской – на 49%. Производительность труда за пятилетие выросла, соответственно, на 55%, 35%, 31%. За счёт повышения производительности труда было получено 70-75% прироста промышленной продукции [24].

Основной вклад в трудовую победу труженников промышленности Среднего Поволжья внесли машиностроители. Машиностроение развивалось в этот период опережающими темпами. Его продукция в Куйбышевской области выросла в 2,64 раза [25], в Ульяновской – на 94% [27]. Важнейшим источником индустриального прогресса Среднего Поволжья стало массовое техническое творчество ИТР и рабочих, внесших большой вклад в совершенствование техники и технологии промышленного производства.

Библиографический список

1. Народное хозяйство Куйбышевской области за 1971-1975 г.г. /Статистический сборник. - Куйбышев, 1976 - С.19.

2. Самарский областной государственный архив социально-политической истории (СОГАСПИ). Ф.1632.Оп.4. Д.23.л.12-14.
3. Государственный архив Российской Федерации (ГАРФ). Ф.5451.Оп.3. Д.27.л.18.
4. ГАРФ. Ф.5451.Оп.1. Д.26.л.119.
5. Центр документации новейшей истории Ульяновской области (ЦДНИУО). Ф.1927.Оп.11. Д.21.л.54.
6. Туранов В. И., Павлович С. С. Участие трудящихся в управлении производством. - Куйбышев, 1978 - С 32.
7. «Ульяновская правда». 1972. 4 июня.
8. СОГАСПИ. Ф.656.Оп.145. Д.20.л.23.
9. «Путь к коммунизму». Многотиражная газета Ульяновского моторного завода, 1975. 27 июня.
10. СОГАСПИ. Ф.656.Оп.150. Д.83.л.73; «Ульяновский комсомолец», 1976. 19 марта; Отдел общественно-политических фондов Государственного архива Пензенской области (ООПФГАПО). Ф.615.Оп.12. Д.15.л.112-113.
11. СОГАСПИ. Ф.1683.Оп.7. Д.10.л.9.
12. ЦДНИУО. Ф.1096.Оп.9. Д.26.л.20.
13. Зимин А. А. Партийное руководство развитием массового технического творчества рабочего класса в 1971-1975 г.г. /на материалах Среднего Поволжья// КПСС и вовлечение рабочих в научно-технический прогресс/ Межвузовский сборник. - Куйбышев, 1982 - С.55.
14. «Волжская коммуна», 1976. 5 марта.
15. СОГАСПИ. Ф.1632.Оп.2. Д.16.л.83.
16. «Моторостроитель». Многотиражная газета завода им. Фрунзе, 1973. 28 января.
17. Семенов П. Школа мастерства. - Куйбышев, 1973 - С. 29.
18. СОГАСПИ. Ф.656.Оп.2. Д.34.л.6.
19. СОГАСПИ. Ф.1632.Оп.4. Д.23.л.55; «Волжская коммуна». 1972. 18 ноября; ГАРФ. Ф.Р.534.Оп.1. Д.3112. л.18; Родной город Ильича. Саратов. Поволжское книжное изд-во, 1976. С.223.
20. СОГАСПИ. Ф.615.Оп.1. Д.1295.л.8; Д.1326.л.188.
21. «Волжская коммуна». 1972. 18 ноября.
22. СОГАСПИ. Ф.1632.Оп.29. Д.103.л.4; Д.11.л.21-22.
23. СОГАСПИ. Ф. 1632.Оп.2. Д.16.л.83.
24. Народное хозяйство Куйбышевской области в 1976-1980 г.г./ Статистический сборник. - Куйбышев. книж. изд-во, 1982 - С.37,46; Очерки истории Пензенской организации КПСС. - Саратов. Поволжск. книж. изд-во. Пензенское отделение. - 1983 - С.378; Ульяновская область в годы Советской власти/Статистический сборник ЦСУ РСФСР. - Стат. управление Ульяновской области. - Ульяновск, 1977 - С.9.
25. Народное хозяйство Куйбышевской области в 1976-1980 г.г. С.65.
26. Народное хозяйство Ульяновской области в 1971-1975 г.г. /Статистический сборник. - Ульяновск, 1976 - С.10.

References

1. National economy of Kuibyshev region in 1971-1975 / Statistical collection. – Kuibyshev, 1976 – p. 19.
2. Samara region state archives of social and political history (SRSASPH). Archive 1632. Inventory 4. File 23. Sheets 12-14.
3. State Archives of the Russian Federation. Archive 5451. Inventory 3. File 27. Sheet 18.
4. State Archives of the Russian Federation. Archive 5451. Inventory 1. File 26. Sheet 119.
5. Documentation centre for Ulianovsk region latest history. Archive 1927. Inventory 11. File 21. Sheet 54.
6. Turanov, V. I., Pavlovitch S. S. Workers' participation in production management. – Kuibyshev, 1978 – p. 32.
7. “Ulianovskaya pravda”. 1972. June 4.
8. Samara region state archives of social and political history. Archive 656. Inventory 145. File 20. Sheet 23.
9. “Put’ k kommunizmu” (Way to communism) Factory paper of Ulianovsk motor plant, 1954, June 27.

10. Samara region state archives of social and political history. Archive 656. Inventory 150. File 83. Sheet 73; "Uljanovskiy komsomol", 1976, March 19; Department of public political archives of Penza region state archives. Archive 615. Inventory 12. File 15. Sheets 112-113.
11. Samara region state archives of social and political history. Archive 1683. Inventory 7. File 10. Sheet 9.
12. Documentation centre for Uljanovsk region latest history. Archive 1096. Inventory 9. File 26. Sheet 20.
13. Zimin, A. A. Communist party management of the development of working class mass engineering creative work in 1971-1975 / Middle Volga Region materials // CPSU and involvement of workers in scientific and technical progress / Interuniversity collection. – Kuibyshev, 1982 – p. 55.
14. "Volzhskaya kommuna", 1976, March 5.
15. Samara region state archives of social and political history. Archive 1632. Inventory 2. File 6. Sheet 83.
16. "Motorostroitel" Factory paper of the plant named after Frunze, 1973, January 28.
17. Semyonov, P. School of skill. – Kuibyshev, 1973 – p. 29.
18. SRSASPH. Archive 656. Inventory 2. File 34. Sheet 6.
19. SRSASPH. Archive 1632. Inventory 4. File 23. Sheet 55; "Volzhskaya kommuna" 1972, November 18; GARF. Archive 534. Inventory 1. File 3112. Sheet 18; Ilyitch's native city. Saratov. Povolzhskoye publishing house, 1976. p. 223.
20. SRSASPH. Archive 615. Inventory 1. File 1295. Sheet 8; File 1326. Sheet 188.
21. "Volzhskaya kommuna" 1972, November 18.
22. SRSASPH. Archive 1632. Inventory 29. File 103. Sheet 4; File 11. Sheets 21-22.
23. SRSASPH. Archive 1632. Inventory 2. File 16. Sheet 83.
24. National economy of Kuibyshev region in 1976-1980 / Statistical collection. – Kuibyshev publishing house, 1982 – p. 37, 46; Studies in the history of Penza CPSU organization – Saratov. Povolzhskoye publishing house. Penza branch. – 1983 – p. 378; Uljanovsk region in the years of Soviet regime / Statistical collection of the Central Statistical Department of the Russian Federation. – Statistical department of Uljanovsk region. – Uljanovsk, 1977 – p. 9.
25. National economy of Kuibyshev region in 1976-1980. p. 65.
26. National economy of Uljanovsk region in 1971-1975 / Statistical collection. – Uljanovsk, 1976 – p. 10.

ENGINEERING CREATIVE WORK OF MACHINE BUILDERS IN THE MIDDLE VOLGA REGION IN 1971 – 1975

© 2008 A. V. Pridatkin

Samara State Aerospace University

The paper deals with forms and methods of involving engineering workers in creative work, in rationalization and invention movement at machine building enterprises of the Middle Volga Region in 1970s.

Scientific and technological revolution, workers' engineering creative work, rationalization and invention movement, industrial enterprises of the Middle Volga Region

Информация об авторе

Придаткин Александр Васильевич, старший преподаватель кафедры политологии и истории СГАУ. Область научных интересов: рабочие и техническая интеллигенция машиностроительной промышленности Среднего Поволжья во второй половине XX века.

Pridatkin, Alexander Vassilievitch, senior lecturer of the department of politology and history, SSAU. Area of research: workers and engineers of machine building industry of the Middle Volga Region in the second half of the 20th century.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПРОДУКТА В АСПЕКТЕ ПОСТУЛАТОВ ЛОГИСТИКИ И ТЕОРИИ ПРЕДМЕТА ТРУДА

© 2008 Т. Н. Соснина

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предлагается вариант трактовки потребительно-стоимостных и стоимостных параметров жизненного цикла продукта с учётом постулатов логистики и теории предмета труда.

Логистика, жизненный цикл готового и конечного продукта, вещественная и не вещественная модели функционирования жизненных циклов продукта

Логистика – новое научное направление, в рамках которого идёт процесс осмысления содержания и формы материального и духовного производства применительно к условиям формирующегося постиндустриального информационного общества. Аналитический аппарат логистики, прежде всего понятийная её составляющая, находятся в стадии становления. Поэтому особую важность приобретают попытки «адаптации» уже имеющегося понятийного аппарата к реалиям современных логистических поисков.

Предпримем попытку с позиций выводов теории предмета труда адаптировать его категориальный аппарат к анализу базовых логистических процедур. С этой целью, *во-первых*, определим отношение к используемому в настоящее время трактовкам содержания логистики; *во-вторых*, проведём сравнительный анализ базовых логистических цепочек; *в-третьих*, суммируем полученную информацию на предмет авторского «прочтения» статуса понятия «жизненный цикл продукта» (готового - конечного).

Первая позиция. Анализ определений логистики ограничим публикациями последних лет (2000-2005 гг.) как наиболее «устоявшимися» с учётом содержащегося в них семантического материала.

1. В логистической цепи, то есть цепи, по которой проходят товарный и информационный потоки от поставщика до потребителя, выделяются следующие главные звенья: закупка и поставка материалов, сырья и полуфабрикатов; хранение продукции и сырья; производство товаров; распределение, вклю-

чая доставку товаров со склада готовой продукции, потребление готовой продукции [1].

2. Логистика – это определённое прогрессивное мышление, методология процесса сквозной организационно-аналитической оптимизации сложных целенаправленных, в том числе слабоструктурируемых, систем, каковыми можно представить любые организационно-экономические, производственно-коммерческие, производственно-хозяйственные и иные потоко-процессуальные виды деятельности [2].

3. Логистическая экономика – экономика, которая структурно, количественно и качественно обеспечивается горизонтальными (продольными по потоку) логистическими связями всех субъектов и процессов экономического действия взамен вертикальных, обеспечивающихся административно-иерархическими системами, «хорошо отработанными и проявившими свои «за» и «против» в тоталитарных народнохозяйственных системах» [2].

4. Логистика – наука о планировании, организации, управлении и контроле за движением материальных и информационных потоков в пространстве-времени от *первичного источника* до *конечного потребителя* [3].

5. Логистика есть система теоретических, методологических и практических знаний об управлении товарными потоками и связанными с ними информационными и финансовыми потоками от источника и места их возникновения до промежуточного или конечного места назначения – потребителя, заказчика [4].

6. Логистика – это наука о планировании, контроле и управлении транспортировкой, складированием и другими материальными и нематериальными операциями, совершающимися в процессе доведения сырья и материалов до производственного предприятия, внутривозвратной переработки сырья, материалов и полуфабрикатов, доведения *готовой продукции* до потребителей в соответствии с интересами и требованиями последнего, а также передачи, хранения и обработки соответствующей информации [5].

7. Логистика – наука управления совокупностью материальных, информационных и кадровых ресурсов. Логистика рассматривается как процесс управления продвижением ресурсов в направлении от рынков факторов производства к рынкам товаров [6].

Определения логистики сходны в главном – они фиксируют внимание на процессуальном качестве предмета исследования. Специфика выражена выделением стадий - звеньев процесса; акцентом на пространственно-временной их параметр; определением вектора продвижения ресурсов; фиксацией внимания на горизонтальных логистических связях; поиском оптимальных вариантов функционирования сложных систем.

Существенным моментом семантического плана является использование понятий «готовый продукт», «первичный источник», «промежуточный» и «конечный потребитель».

Вторая позиция. Сравнительный анализ логистических цепочек даёт возможность рассмотреть содержательную и формальную стороны логистического процесса, показать терминологическую его базу, связь последней с интересующими нас понятиями «жизненный цикл готового продукта» и «жизненный цикл конечного продукта».

Показательна в этом отношении целевая установка авторов монографии [2] на унификацию теоретических основ новой научной дисциплины посредством использования понятия идеализированного объекта (циклы потоковых процессов). «Построение идеализированного объекта, - утверждают они, - фактически сводится к *вычленению исходной схемы понятий*» (выделено мною – Т.С.) И

далее. «При этом математическое моделирование идеализированного объекта лишь обозначается в своих возможностях и ограничениях, учитывая сверхсложность экономических процессов и субъективных отношений в них, то есть *практическую невозможность построения достаточно адекватных действительности математических их моделей как целостности*» (выделено мною – Т. С.).

Авторы [2] определяют своё отношение к понятиям «процесс» и «поток», «логистическая система», «логистическая цепь», «доводка логистическая» и др., дифференцируют виды логистики, формируют основные постулаты теории логистики, конкретизируют феномен качества (перенос качества процесса на качество результата) и принцип жизненного цикла (состоящий из звеньев: бизнес-план, НИОКР, проектирование, организация производства, функционирование, включающее сбыт), определяют отношение параметра эффективности к параметру конечного результата, рассматривают проблемы методологических и методических основ прогнозирования в логистике, анализируют с системно-синергетических позиций функционирование логистических систем. Авторы подчеркивают, что теория логистики по-новому трактует организацию движения продукта в сфере производства и обращения, позволяет комплексно, с системных позиций анализировать вопросы снабжения, сбыта и распределения готовой продукции.

В коллективной монографии [3] говорится о реальных трудностях изучения проблем логистики, что сгруппировано в трёх суждениях.

1. Без описания (систематизации, формализации и т.п.), в первую очередь, материальных потоков невозможно становление и развитие логистической науки.

2. Аналитический аппарат логистики характеризуется «нервозностью и незавершёностью».

3. Многочисленные варианты расчетов с использованием математических моделей выполняются без наполнения общетеоретических положений реальными данными [3].

Авторы считают: «До последнего времени главным аспектом логистики являлись,

в основном, вопросы терминологии и понятийного аппарата (принципы, цели, задачи). Однако *вторая не менее важная часть теории логистики – методология – в настоящее время представляет собой, скорее, набор отдельных моделей (методов и алгоритмов), практически не систематизированных и недостаточно изученных. Парадокс в том, что мы говорим об интегральной логистике, а не имеем ни одной пространственно-временной модели, описывающей поведение материального потока и охватывающей несколько звеньев логистической системы*».

В [5] обращается внимание на сервисное обслуживание, которое рассматривается в трёх качественно различных, но связанных друг с другом стадиях жизненного цикла продукта: предпродажные услуги; услуги, сопутствующие процессу продажи; послепродажные услуги.

С нашей точки зрения, особую значимость имеет включение в качестве особых компонентов послепродажного обслуживания наряду с гарантийными и ремонтными работами; снабжением запчастями; созданием инфраструктуры сервиса утилизации продукта [7].

Аналогичная мысль содержится в [6]. Классифицируя материальные запасы, авторы сочли целесообразным выделить в самостоятельную группу отходы производства и вторичные материалы. Это тем более значимо, что данный параметр не просматривается в большинстве работ по данной тематике в России и за рубежом [7].

Остановимся на исследовании [11], где используются интересующие нас понятия «готовый и конечный продукт» (первый момент) в сопряжении с параметром стоимости (второй момент).

Логистические затраты авторы подразделяют на два вида: затраты на формирование конечного продукта и транзакционные затраты. Под первыми подразумеваются затраты производителя на преобразование сырья в продукт, под вторыми – затраты по их логистическому продвижению к потребителю. Налицо терминологическое «смещение»: понятия готовый и конечный продукт не дифференцируются в пространственно-времен-

ном отношении. Строго говоря, о логистической производственной цепочке здесь можно вести речь лишь «в первом приближении». Положительным, на наш взгляд, является стремление авторов использовать в целях логистического анализа понятия «потребительная стоимость» и «стоимость».

Симптоматично появление работ, связанных с дискуссией о том, как обеспечить экономический рост с необходимыми параметрами динамики, устойчивости, ресурсоёмкости и т.д. и внимание к исследованию феномена длинных хозяйственных цепей [8]. С точки зрения логистических аксиом технология длинных хозяйственных цепей, предполагающих создание взаимозависимых производств, способных «рождать» новые производства, может стать органичным дополнением современной системы хозяйствования. Такой подход подтверждается и выводами теории предмета труда. Остановимся на них подробнее.

Определим точки соприкосновения терминологии теории предмета труда с понятийным аппаратом, применяемым в теории логистики для понимания сущности жизненных циклов продукта.

Сделаем предварительные замечания.

Предметы природы претерпевают ряд метаморфоз прежде чем стать конечным продуктом. Эти метаморфозы целесообразно представить в виде сменяющих друг друга предметов труда условного, первичного и вторичного. *Условный, или потенциальный, предмет труда* есть предмет природы, ставший объектом теоретического исследования. Практически он ничем не отличается от предметов природы, которые продолжают существовать в «чистом виде». Но условный предмет труда *уже* отличается от предмета природы, ибо человек приступил к изучению и оценке его потребительских свойств.

Первичные предметы труда являются предметами природы, ставшими объектом изменений в сфере материального производства. Здесь труд отделяет предметы природы от материнского тела (Земли), превращая их в *первичные предметы труда*, итогом функционирования которых является сырой материал (готовый, промежуточный продукт).

Первичные предметы труда образуют основу *предмета труда вторичного* в отраслях обрабатывающих и перерабатывающих производств, который от первичного отличается тем, что объектом здесь служат не предметы природы в первозданном виде, а преобразованные трудом материалы – готовый продукт (сырой материал).

Роль системообразующего, соединяющего три основных элемента структуры предмета труда (условный, первичный, вторичный) в одно функционирующее целое, выполняет последовательно реализуемое в природном социальное начало – труд. «Процесс угасает в продукте ... то, что на стороне рабочего проявлялось в форме деятельности ... теперь на стороне продукта выступает в форме покоящегося свойства ... в форме бытия» [9].

Имеющиеся в литературе ответы на вопрос, что представляет собой конечный продукт, трудно признать достаточно убедительными.

Для каждого предприятия продукт является конечным в том смысле, что он «закрывает» конкретную технологическую цепочку. Однако с точки зрения более протяжённого в пространственно-временном плане производственного процесса этот продукт является промежуточной продукцией, которая подготовлена к включению в новые производственные процессы.

Можно ли по какому-то основанию достаточно чётко разграничить в бесконечном многообразии продуктовых потоков готовую и конечную продукцию? Шаги в этом направлении предпринимались и сводились, с нашей точки зрения, к вполне убедительной аргументации, что конечным продуктом в его натуральной форме являются средства производства и предметы потребления, а в денежной – стоимость потреблённых средств производства, перенесённых на продукт и вновь созданную стоимость – национальный доход.

С позиций теории предмета труда можно найти достаточно чёткую границу между готовым и конечным продуктом по *объективному основанию*, апеллируя к материально-вещной основе конечного и готового продукта – предмету труда процесса-целостности.

Функционирование предмета труда – процесса предваряет появление как готового, так и конечного продукта, фиксируя специфичность и общность их субстратов.

Наша посылка основана на том, что конечный продукт может быть признан таковым лишь пройдя все стадии функционирования предмета труда – процесса целостности: условного, первичного и вторичного, которые образуют вещественную субстанцию конечного продукта. Им выступают продукты, способные удовлетворить общественную потребность в средствах производства (средства труда, условия труда), средствах жизнеобеспечения (средства жизни человека-общества), которые, завершив свой жизненный цикл, превращаются в отходы.

В рамках такой интерпретации готовый продукт всегда является промежуточным, так как он проходит лишь *часть пути* в рамках предмета труда – целостности. Это *или* результат функционирования условного предмета труда (продукт труда учёного, конструктора, архитектора, геолога и т.д.), *или* результат функционирования предмета труда первичного (продукт труда горнодобывающих производств, земледелия и т.д.). Готовый продукт имеет квазиконечную форму по отношению к технологическому процессу, где он создаётся. Его «предназначение» в том, чтобы стать компонентом других технологических процессов, в рамках которых может создаваться *ad litteram* (буквально) конечный продукт. Так, продукт труда учёного, конструктора, архитектора материализуется в концепциях, проектах, чертежах; продукт труда добывающих производств – в рудном и нерудном сырье; металлургических, машиностроительных, обрабатывающих отраслях, производстве строительных материалов – в прокат, машины, кирпич, цемент и т.д.

В теоретическом отношении вышеописанные процессы могут быть зафиксированы как определённого рода связи природного и социального начал продукта.

Предмет труда добывающих отраслей (равно как и в аналогичных сферах человеческой деятельности: земледелии, лесозаготовки, ГЭС и др.) необходимо вначале отделить от тела природы, «насытить» тру-

дом, сделать пригодным к дальнейшему употреблению. «Все предметы, которые труду остаётся лишь вырвать из их непосредственной связи с землёй, суть данные природой предметы труда. Например, рыба, которую ловят, отделяют её от её жизненной стихии – воды, дерево, которое рубят в лесу, руда, которую извлекают из недр» [9].

В любой ситуации первичному предмету труда предшествует условный, вторичному – первичный, конечному продукту – вторичный предмет труда. Условный предмет труда отличается от предмета природы только тем, что человек приступил к изучению и оценке его свойств (*первый вариант готового продукта*). Первичный предмет труда отличается от условного тем, что здесь природный субстрат начинает изменять свою форму под влиянием труда живого и овеществлённого. Результат функционирования предмета труда первичного – сырые материалы – приобретает способность включаться в более сложные технологические режимы (*второй вариант готового продукта*). Руда, лесные, строительные материалы – *одно* качественное состояние; слиток металла, деревянные конструкции – *другое*. Во втором случае информационный параметр субстрата продукта выше, и это даёт возможность использовать его в более сложных производственных циклах (слиток, деревянные конструкции подготовлены к участию в различных видах производств). Вторичный предмет труда отличается от первичного тем, что в его рамках возможно создание конечного продукта (руда, лесные материалы такими возможностями не обладают).

Вторичный предмет труда способен удовлетворить более разнообразный спектр потребностей человека, чем первичный. Информация, исходящая от человека и средств труда, «накладывается» здесь вторым «слоем» на ту, которая была получена субстратом первичного и условного предметов труда.

Готовый продукт – это суммарный итог различных видов производственной деятельности человека (общества), который *не прошёл все стадии функционирования предмета труда-целостности*: нулевого, первичного и вторичного.

Конечный продукт – суммарный итог производственной деятельности человека (общества), который прошёл все стадии функционирования предмета труда-целостности и может быть использован в производственном и индивидуальном потреблении [10, 11].

Понятия потенциальный (условный), первичный и вторичный предметы труда минимизируют используемый логистикой понятийный аппарат, одновременно повышая его точность: с их помощью «снимаются» теоретические «разломы» трактовки готового и конечного продукта, имеющие следствием не только теоретические погрешности, но и практические ошибки; приобретают конкретику все типы трансакции; появляется возможность продолжения логистических цепочек по горизонтали (имеются в виду стыки с предметом природы в начале процесса производства и по его завершении: «возвращение» ресурсов в биогеохимические жизненные циклы планеты или предшествующие подциклы логистических цепочек в разных «точках» их функционирования).

Рассмотрим два базовых варианта функционирования жизненных циклов продукта в вещественной (потребительно-стоимостной) и невещественной (стоимостной).

Первый вариант: вещественная и невещественная модели - **традиционный тип**.

Вещественная (природно-продуктовая) модель рассматривается как производное трёх составляющих.

Закупка - снабжение - производство - сбыт - распределение (базовая структура модели).

Разработки (теоретические исследования), предваряющие производственный процесс, определяющие возможные типы связей с поставщиками.

Сервисное обслуживание, завершающее основной цикл производства продукции, удовлетворяющее потребности рынка сбыта и отвечающее за утилизацию эксплуатационных отходов.

Невещественная (затратная) модель фиксирует стоимостное выражение ресурсов, израсходованных в ходе производственного процесса с применением показателей фактических и альтернативных цен.

Это наиболее полная информация о «границах» рассматриваемой логистикой экономической системы.

Понятие «жизненный цикл готового продукта» (готовый продукт) используется: 1) для обозначения всех ступеней технологических процессов и работ (полуфабрикаты, продукт незавершённого производства, промежуточный продукт и др.); 2) как синоним «конечного продукта» деятельности отдельных экономических субъектов.

Публикации по логистике, как правило, уделяют внимание цепочкам, «замкнутым» на нужды конкретного экономического субъекта, что вполне объяснимо в условиях рыночной системы хозяйствования, когда взаимоотношения между субъектами национально-хозяйства «работают» в режиме урезанных, неполноценных цепей¹. Характерный признак работ, посвящённых проблемам логистики, состоит и в том, что в них не уделяется должного внимания «побочным видам продукции», сопровождающим получение готового и конечного продукта. Ряд авторов, в основном экономисты, занимающиеся вопросами природопользования, отмечают в природно-продуктовой системе наличие загрязнений, отходов [1-14, 5, 6, 15, 16-18].

Второй вариант: вещественная (потребительно-стоимостная) и неимущественная (стоимостная) модели - **нетрадиционный тип**.

Отличие логистического анализа нетрадиционного типа от традиционного состоит в существенном расширении его пространственно-временных границ, введении в логистический анализ наряду с основной цепочкой: предмет природы → предмет труда (условный, первичный, вторичный) → конечный продукт → предмет природы; параллельных, фиксирующих движение «незапрограммированной, побочной продукции». Объектом теории предмета труда, таким образом, становится функционирование не одной, а двух вещественных (природно-стоимостных) и двух неимущественных (стоимостных) цепочек, в совокупности характеризующих жизненный цикл продукта.

Вещественная потребительно-стоимостная цепочка представлена в форме движения природно-субстратной основы: «предмет природы - готовый продукт - конечный продукт - предмет природы» и в форме движения природно-субстратной основы *побочных продуктов*, образующихся при создании готового и конечного продуктов в рамках технологических режимов производства, при использовании потребительских свойств конечной продукции в процессе её эксплуатации и утилизации с включением техногенного субстрата в биогеохимические циклы Земли.

Неимущественные (стоимостные) цепочки являются денежным выражением затрат на процессы производства-потребления, утилизации технологических отходов и конечной продукции по истечении сроков её физического и морального износа.

Вещественная потребительно-стоимостная цепочка характеризуется стадиями жизненных циклов: предмет природы → предмет труда (условный, первичный, вторичный) → конечный продукт → предмет природы.

Теоретическое и методологическое обоснование нетрадиционных моделей жизненных циклов продукта содержится в работах [10, 11, 19, 20, 21].

Библиографический список

1. Логика [Текст] /Под ред. Б. А. Аникина.- М., 2000.
2. Семенов, А. И. Логистика. Основы теории [Текст] /А. И. Семенов, В. И. Сергеев. - СПб., 2001.
3. Модели и методы теории логистики [Текст] /Под ред. В. С. Лукинского. - СПб., 2003.
4. Бекунина, И. М. Управление логистической системой. Методологические аспекты /И. М. Бекунина, И. И. Кретов // Менеджмент в России и за рубежом. - 2003. - № 5.
5. Чудаков, А. Д. Логистика. 500 вопросов и ответов [Текст] /А. Д. Чудаков. - М., 2005.
6. Долгов, А. П. Логистический менеджмент фирмы [Текст] /А. П. Долгов, В. К. Козлов, С. А. Уваров. - СПб., 2005.

¹ Функционирование транснациональных корпораций требует особого анализа, не отменяющего, однако, постулаты теории предмета труда.

7. Линдерс, М. Р. Логистика [Текст] / М. Р. Линдерс, Х. Е. Фирон. - СПб., 1999.
8. Рахаев, В. Длинные хозяйственные цепи в национальном хозяйстве /В. Рахаев, М. Кокова, Е. Е. Раха // Общество и экономика. - 2005. - № 2.
9. Маркс, К. Сочинения [Текст]/Маркс К., Энгельс Ф. - М. Том 23. Капитал.
10. Соснина, Т. Н. Предмет труда. Философский анализ [Текст] / Т. Н. Соснина. - Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1976.
11. Соснина, Т. Н. Материальные и информационные потоки производства [Текст] / Т. Н. Соснина. - Самара, 1997.
12. Бобылев, С. Н. Экономика природопользования [Текст]/С. Н. Бобылев, А. Ш. Ходжаев. - М., 1997.
13. Гаджинский, А. М. Логистика [Текст] /А. М. Гаджинский. - М., 2000.
14. Экология и экономика природопользования [Текст]/Э. В. Гирусов и др. - М., 1998.
15. Козловский, В. А. Логистический менеджмент [Текст] /В. А. Козловский, Э. А. Козловская, Н. Т. Севруков. - СПб., 2002.
16. Папанов, К. В. Экономические решения и состояние окружающей среды // Вест. Моск. ун-та. - Сер. 6. Экономика. - 2001.- № 5.
17. Потравный, И. М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рынками [Текст] /И. М. Потравный, Т. М. Тихомирова. - М., 2003.
18. Эйсен, Н. Ф. Алгоритмы управления статистическим ростом и динамическим развитием предприятия /Н. Ф. Эйсен // Менеджмент в России и за рубежом. - 2005.
19. Соснина, Т. Н. Предмет труда и современное производство [Текст]/Т. Н. Соснина. - Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1984.
20. Соснина, Т. Н. Биосфера (анализ стоимостных параметров) [Текст] /Т. Н. Соснина. - Самара, 2004.
21. Соснина, Т. Н. Продукты природы и общества: сравнительный анализ [Текст] / Т. Н. Соснина. - Самара, 2007.

References

1. Logic / Edited by B. A. Anikin. – Moscow, 2000.
2. Semenenko, A. I. Logistics. Theoretical foundations. /A. I. Semenenko, V. I. Sergeyev. – Saint Petersburg, 2001.
3. Models and methods of logistics theory / Edited by V. S. Lukinsky. – Saint Petersburg, 2003.
4. Bekunina, I. M. - Managing a logistic system. Methodological aspects. / I. M. Bekunina, I. I. Kretoy // Management in Russia and abroad. – 2003. – No. 5.
5. Tchudakov, A. D. Logistics. 500 questions and answers A. D. Tchudakov – Moscow, 2005.
6. Dolgov, A. P. Logistic management of a company / A. P. Dolgov, V. K. Kozlov, S. A. Uvarov. – Saint Petersburg, 2005.
7. Linders, M. R. Logistics / M. R. Linders, H. Ye. Firon. – Saint Petersburg, 1999.
8. Rakhayev, V. Long economic chains in national economy / V. Rakhayev, M. Kokova, Ye. Ye. Rakha // Society and economy. – 2005 – No. 2.
9. Marx, K. Works. / Marx K., Engels F. – Moscow. Vol. 23. Capital.
10. Sosnina, T. N. Object of labour. Philosophical analysis / T. N. Sosnina. – Saratov: Publishing house of Saratov university, 1976.
11. Sosnina, T. N. Material and information flows of production / T. N. Sosnina. – Samara, 1997.
12. Bobylev, S. N. Economics of nature management / S. N. Bobylev, A. Sh. Khodzhayev. – Moscow, 1997.
13. Gadzhinsky, A.M. Logistics /A.M.Gadzhinsky. – Moscow, 2000.
14. Ecology and economics of nature management / E. V. Girusov et al. – Moscow, 1998.
15. Kozlovsky, V.A. Logistic management /B. A. Kozlovsky, E. A. Kozlovskaya, N. T. Sevrukov. – Saint Petersburg, 2002.
16. Papanov, K. V. Economic decision and the condition of environment // Moscow University Vestnik (Bulletin) – Series 6 Economics. – 2001. – No. 5.
17. Potravny, I. M. Methods of analysis and management of ecologo-economic markets. /

I. M. Potravny, T. M. Tikhomirova. – Moscow, 2003.

18. Eisen, N. F. Algorithms of managing a company's statistical growth and dynamic development /H. F. Eisen // Management in Russia and abroad. – 2005.

19. Sosnina, T. N. Object of labour and

modern production. / T. N. Sosnina. – Saratov: Publishing house of Saratov University, 1984.

20. Sosnina, T. N. Biosphere (analysis of cost parameters) /T. N. Sosnina, – Samara, 2004.

21. Sosnina, T. N. Products of nature and society: Comparative analysis / T. N. Sosnina. – Samara, 2007.

PRODUCT LIFE CYCLE IN THE ASPECT OF POSTULATES OF LOGISTICS AND LABOUR OBJECT THEORY

© 2008 T. N. Sosnina

Samara State Aerospace University

The paper proposes a way of treating consumer cost and cost parameters of a product life cycle with regard to the postulates of logistics and labour object theory.

Logistics, life cycle of finished product and final product, material and non-material models of product life cycle functioning

Информация об авторе

Соснина Тамара Николаевна, заведующий кафедрой политологии и истории, доктор философских наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королева. Область научных интересов: методология функционирования материальных и информационных потоков, социальная экология, теория управления.

Sosnina, Tamara Nikolayevna, head of department of politology and history, Doctor of philosophical science, professor of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. Area of research: methodology of functioning of material and information flows, social ecology, theory of management.

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА

№ 1 (14)

2008

Корректор **Карпова Л. М.**
Компьютерная вёрстка **Коломиец В. В.**
Переводчик **Безрукова Е. И.**
Технолог **Никонов В. В.**

Каталожная цена: 350 руб.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Тираж 200. Заказ 30.

Отпечатано в ОГБ НИР
Самарского государственного аэрокосмического университета
443086, Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала
«Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета
имени академика С. П. Королёва»**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере на одной стороне бумаги в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Прохорову Александру Георгиевичу по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, 212а – 3А, тел.: (846) 267 48 41, электронная почта: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word на дискетах, CD или DVD. Объём статьи - до 10 страниц формата А4. Имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc. Поля - по 2 см с каждой стороны, текст - кегль 12, одинарный междустрочный интервал. Выравнивание: по ширине страницы. Шрифты - Times New Roman, Symbol. Отступ первой строки абзаца - 1 см. Страницы должны быть пронумерованы.

Замена буквы «ё» на букву «е» недопустима. Написание в тексте буквы «ё» является обязательным.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG. Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку, подпись располагается снизу, выравнивание – по центру. Для ссылки по тексту статьи на рисунок 1 следует использовать сокращение: рис. 1.

Для математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 и буквы латинского (*Times New Roman, курсив, размер 12*) и греческого (*Symbol, курсив, размер 12*) алфавитов. Формулы, на которые в статье делаются ссылки, следует печатать с новой строки, при этом формулы нумеруются в порядке следования по тексту статьи. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Длина формулы на строке строго ограничена – до 80 мм (допускается перенос на следующие строки).

Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и её номера по порядку, заголовок размещается сверху, выравнивание – по левому краю. Для ссылки по тексту статьи на таблицу 1 следует использовать сокращение: табл. 1.

4. Библиографический список оформляется отдельным разделом в конце статьи, при этом литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка, и оформляется в соответствии с действующим ГОСТ.

5. К тексту статьи прилагается направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ), рецензия специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы), акт экспертизы, информация об авторах для опубликования в журнале. На отдельной странице указываются сведения об авторах для служебного пользования: фамилия, имя, отчество, должность, учёная степень, учёное звание, место работы, служебный и домашний адреса, телефон, электронная почта. Статья должна быть подписана всеми авторами.

6. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Образец оформления

УДК 536.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ ЗАМКНУТОЙ СТРУКТУРЫ НА БОРТУ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

© 2006 Г. П. Аншаков¹, В. В. Бирюк², В. В. Васильев², В. В. Никонов², В. В. Салмин²

¹ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

²Самарский государственный аэрокосмический университет

(аннотация статьи объёмом 50...150 слов, кегль: 10)

(ключевые слова объёмом 8-12 слов, кегль: 10, начертание: курсив)

(текст статьи)

(библиографический список)

(информация об авторах для опубликования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, электронная почта, область научных интересов - до 10 слов)

THERMAL FIELDS SIMULATING OF COMPLEX CLOSED STRUCTURE ABOARD RESEARCH SPACE LABORATORY

© 2006 G. P. Anshakov¹, V. V. Biruk², V. V. Vasiliev², V. V. Nikonov², V. V. Salmin²

¹«Progress» Design Bureau

²Samara State Aerospace University

(аннотация статьи - на английском языке)

(ключевые слова - на английском языке)

(библиографический список - на английском языке)

(информация об авторах - на английском языке)

