

УДК 629.73.004.82:532.525.6

А.В. ГАЙДАЧУК, А.М. ГРУШЕНКО, Т.П. НАБОКИНА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОТОКОМПРЕССОРНЫХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Предложена классификация нашедших широкое применение термогазоструйных технологий и оборудования как частных реализаций мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей (МК ВРД). Такой подход позволяет использовать накопленные знания в области МК ВРД для исследования и расчетов параметров газоструйного оборудования. Предложена классификация МК ВРД технологического назначения, которая подразделяет газоструйное оборудование на две группы. Они характеризуются выходными технологическими параметрами  $T_{СВГС} = \dot{m} \times P_K^*$  и  $T_{ДВГС} = \dot{m} \times W_C$  в зависимости от характера истечения продуктов сгорания из сопла.*

**Ключевые слова:** мотокомпрессорные воздушно-реактивные двигатели, сверхзвуковые газовые струи, дозвуковые газовые струи, термогазоструйные технологии и оборудование.

**Введение**

Мотокомпрессорные воздушно-реактивные двигатели давно известны и применяются в качестве энергосиловых установок уникальных и специфических летательных аппаратов [1]. Существует также технологическая ниша применения МК ВРД в различных областях деятельности человека. Так высокоскоростные высокоэнтальпийные струи продуктов сгорания, полученные при сжигании углеводородных топлив в воздухе, предварительно сжатом с помощью компрессора с независимым приводом, широко применяются для добычи и обработки гранита [2]; для технологических операций продувки и просушки в дорожно-строительных работах, в различного рода парогазовых и термогазоабразивных очистителях [3], при утилизационной резке аэрокосмической техники [4], а также для реализации целого ряда полезных и эффективных технологий, научно-практическая разработка которых не прекращается в лаборатории «Энергия» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», в лабораториях МГТУ им. Баумана и Государственного аэрокосмического университета (г. Самара, Россия). Несмотря на многообразие технологических применений источников сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй (СВГС) и дозвуковых высокотемпературных газовых струй (ДВГС), базирующихся на энергетически независимой мотокомпрессорной части, их объединяет общий признак – они представляют собой не что иное, как наземный вариант МК ВРД. При этом конструктивно они могут существенно отличаться от последних, что продиктовано условиями и целями их при-

менения, а термогазодинамические принципы их функционирования в основном идентичны. Выходные же параметры авиационных МК ВРД в зависимости от условий и скорости полета летательных аппаратов также коррелируют с условиями технологического применения МК ВРД – в некоторых случаях необходима сверхзвуковая высокотемпературная струя (добыча и обработка гранита, термогазоабразивная очистка), что соответствует характерным высокоскоростным режимам полета ЛА, а получение дозвуковых высокотемпературных струй соответствует небольшим скоростям полета ЛА, оснащенного МК ВРД.

**Формулирование проблемы.** Многообразие технологически ориентированных МК ВРД требует систематизации и обобщения подходов к их проектированию, выбору параметров мотокомпрессорной части, камеры сгорания, сопла.

Кроме того, экономическая и коммерческая эффективность применения технологических МК ВРД породили терминологическую путаницу в позиционировании данных устройств. В научных публикациях стали встречаться термины «огневое копье», «огневая пушка» и другие, которые не могут характеризовать исследуемые объекты и происходящие в них процессы и пригодны лишь для рекламных и научно-популярных изданий. Даже в названиях квалификационных работ, посвященных исследованию термогазоструйных устройств и защищаемых по специальности 05.07.05, изобилует терминология, не соответствующая данной специальности, в то время как позиционирование любого термогазоструйного устройства, как МК ВРД технологического назначения, снимает проблему соответ-

ствия диссертационной работы шифру специальности 05.07.05.

Таким образом, проблематика настоящей работы состоит в классификации технологических МК ВРД в зависимости от их назначения, а также систематизации и обобщении их основных параметров.

### Классификация МК ВРД технологического назначения

Технологические МК ВРД в зависимости от особенностей и свойств объектов их воздействия могут быть разделены на две группы:

- с высокой концентрацией (фокусированием) энергии в СВГС на выходе ее из сопла;
- с высокой тепловой мощностью ДВГС на выходе ее из сопла и низкой концентрацией энергии струи.

В первом случае высокая концентрация энергии достигается за счет относительно высокого полного давления  $P_K^*$  на выходе из компрессорной части МК ВРД  $P_K^* = 0,5...1,3$  МПа. Это позволяет сфокусировать тепловую энергию, которая выделилась при сгорании углеводородного топлива при  $\alpha_{ок} = 1,0...1,2$  в СВГС. Удельный тепловой поток, реализуемый в таких струях при их истечении через сопло критического перепада, составляет  $q = (1,05...2,95)10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Такая концентрация энергии обуславливает возможность реализации следующих технологий:

- добыча блочного гранита из массивов гранитных карьеров, при этом тепловая мощность МК ВРД должна быть не ниже  $N_T = 300$  кВт, что обусловлено особенностями выемки блоков [2];
- скульптурная обработка и термообработка гранитных изделий, тепловая мощность МК ВРД при этом не бывает ниже  $N_T = 100$  кВт, что обусловлено особенностями и размерами кристаллической структуры большинства гранитов;
- парогазогенерации для тушения пожаров, обеззараживания различных объектов; работают при повышенных  $P_K^*$ , что позволяет обеспечить дальность парогазовой струи и повысить эффективность указанных технологий; тепловая мощность при этом может колебаться в широком диапазоне  $N_T \approx 100...500$  кВт, в зависимости от характеристик объекта воздействия.

Другие технологические МК ВРД сведены в классификацию, представленную на рис. 1. Следует отметить, что классификация является неполной и

открытой, может дополняться по мере появления новых технологий. Основным технологическим параметром, который обеспечивает реализацию технологий, основанных на СВГС, является технологический параметр

$$T_{\text{СВГС}} = \dot{m} \cdot P_K^*,$$

где  $\dot{m}$  – расход продуктов сгорания;  $P_K^*$  – давление в камере сгорания МК ВРД.

Величина  $\dot{m}$  характеризует тепловую мощность МК ВРД при заданной величине  $\alpha_{ок}$ , а  $P_K^*$  – концентрацию энергии СВГС.

МК ВРД с дозвуковым истечением продуктов сгорания из сопла используются в качестве теплогенераторов, а также для просушки и продувки асфальтобетонных покрытий в процессе их ремонта. Основным технологическим параметром, определяющим эффективность процессов, является,

$$T_{\text{ДВГС}} = \dot{m} \cdot W_C,$$

где  $W_C$  – скорость истечения ДВГС из сопла МК ВРД.

Очевидно, чем выше скорость  $W_C$ , при прочих равных условиях, тем эффективнее используется тепловая энергия, прямо пропорционально зависящая от  $\dot{m}$ . Этот параметр актуален в теплообменных устройствах, при просушке и продувке технологических объектов.

Последнее применение особенно актуально для дорожно-ремонтных работ. В этом случае реализуется приемлемое сочетание тепловой мощности струи и ее скорости. Увеличение  $W_C$  способствует интенсификации процессов теплообмена с преградой (сушке покрытия), а кинетическая энергия струи обеспечивает метательное действие, за счет которого с ремонтируемого участка удаляются твердые частицы, пыль и вода, оптимальное сочетание  $F_C$  и  $W_C$  требует дополнительных исследований.

### Заключение

Рассмотрение так называемого термогазо-струйного оборудования и инструментов различного назначения как частных случаев реализации мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей позволяет осуществлять расчеты входных и выходных параметров такого оборудования, базируясь на накопленном опыте расчета МК ВРД, обеспечить единообразие терминологии, максимально приблизив ее к общепринятой в аэрокосмической области знаний. Для МК ВРД с характерным сверхзвуковым и дозвуковым истечением продуктов сгорания введены соответственно технологические параметры:

$$T_{\text{СВГС}} = \dot{m} \cdot P_K^* \text{ и } T_{\text{ДВГС}} = \dot{m} \cdot W_C.$$

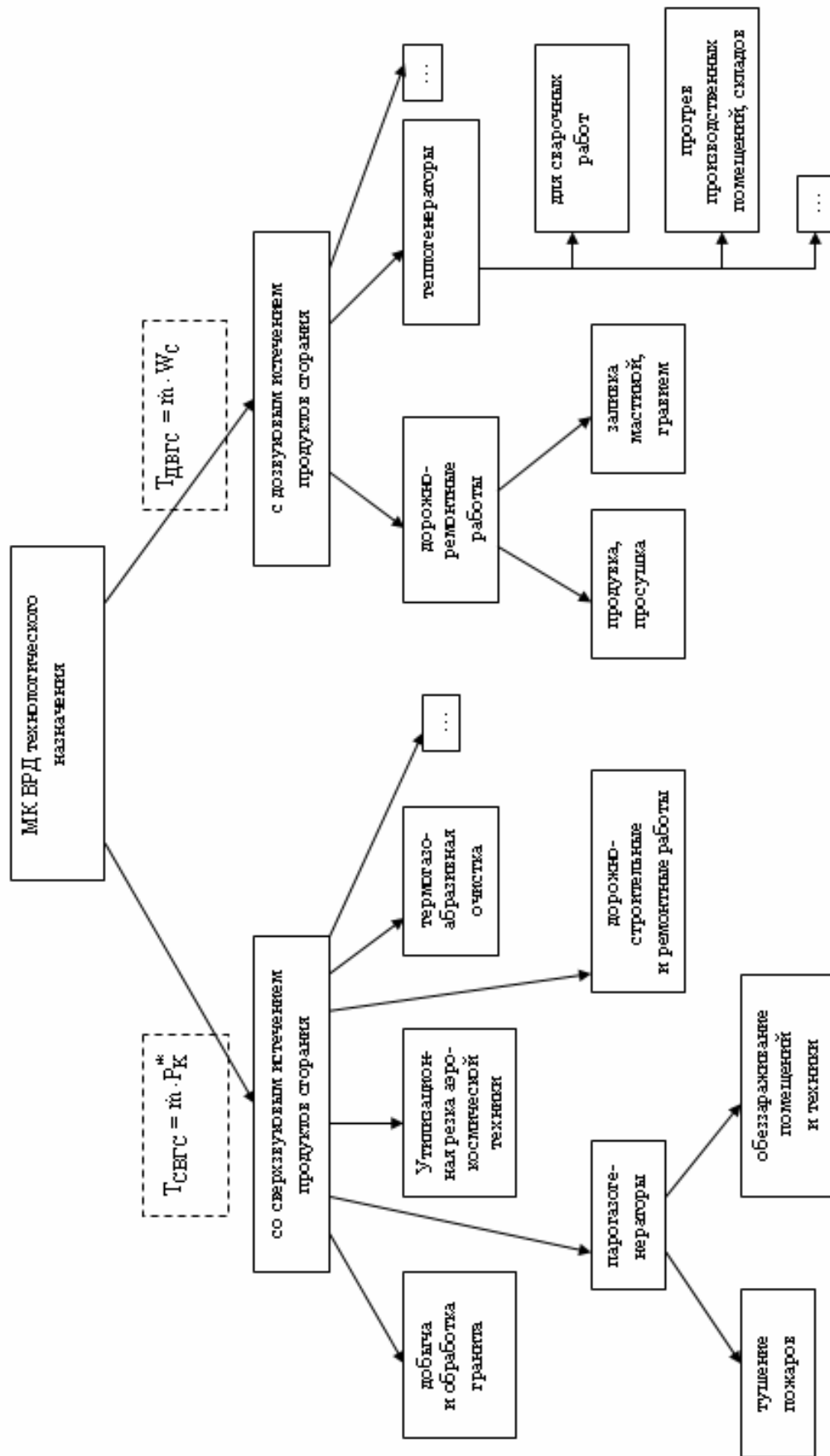


Рис. 1. Классификация МК ВРД технологического назначения

Параметр  $T_{\text{СВГС}}$  характеризует степень фокусировки тепловой энергии, а  $T_{\text{ДВГС}}$  определяет степень распределенности тепловой энергии по поверхности обрабатываемого объекта или, что тоже самое, степень трансформации тепловой энергии струи в ее скоростной напор.

### Литература

1. *Теория реактивных двигателей. Рабочий процесс и характеристики / Под ред. академика Б.С. Стечкина.* – М.: Госд. изд-во оборонной промышленности, 1958. – 534 с.

2. *Карасев Ю.Г. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня: учебное пособие / Ю.Г. Карасев, Н.Т. Бакка.* – СПб., 1997. – 428 с.

3. *Кисель В. Сверхзвуковая струя / В. Кисель, Ю. Евдокименко, В. Кадыров // ММ. Деньги и технологии.* – 2000. – № 3 (5). – С. 52-55.

4. *Набокина Т.П. Влияние режимных параметров ЖРД МТ на процессы разупрочнения алюминиевых сплавов в зоне воздействия сверхзвуковой газовой струи / Т.П. Набокина, А.В. Гайдачук, А.М. Грушенко // Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал.* – 2007. – № 7 (43). – С. 78-80.

Поступила в редакцию 19.05.2010

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОТОКОМПРЕСОРНИХ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*О.В. Гайдачук, О.М. Грушенко, Т.П. Набокина*

Запропонована класифікація термогазоструменевих технологій і устаткування як окремих реалізацій мотокомпресорних повітряно-реактивних двигунів (МК ПРД). Такий підхід дозволяє використовувати накопичені знання в області МК ПРД для дослідження і розрахунків параметрів газоструменевих устаткування. Запропонована класифікація МК ПРД технологічного призначення, яка підрозділяє газоструменеве устаткування на дві групи. Вони характеризуються вихідними технологічними параметрами  $T_{\text{НВГС}} = \dot{m} \cdot P_K^*$  та  $T_{\text{ДВГС}} = \dot{m} \cdot W_C$  залежно від характеру витікання продуктів згорання з сопла.

**Ключові слова:** мотокомпресорні повітряно-реактивні двигуни, надзвукові газові струмені, дозвукові газові струмені, термогазоструменеві технології та устаткування.

### CALCULATION OF TECHNOLOGICAL MOTOCOMPRESSOR AEROJET ENGINES PARAMETERS

*A.V. Gaydachuk, A.M. Grushenko, T.P. Nabokina*

Systematization of hightemperature gas-streams technologies and equipment as private realization of motocompressor aerojet engines (MC AJE) are offered. Such approach allows to use the accumulated knowledge in area of MC AJE for research and calculations of gas-streams equipment parameters. Classification of technological MC AJE, which subdivides a gas-streams equipment into two groups, is offered. They are characterized by technological out parameters  $T_{\text{SSGS}} = \dot{m} \cdot P_C^*$  and  $T_{\text{SbSGS}} = \dot{m} \cdot W_C$  depending on character of expiration of combustion products from a nozzle.

**Key words:** motocompressor aerojet engines, supersonic gas streams, subsonic gas streams, hightemperature gas-streams technologies and equipment.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.gaydachuk@khai.edu.

**Грушенко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aagrushenko@mail.ru.

**Набокина Татьяна Петровна** – инженер 1-й категории кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tnabokina@ukr.net.

УДК 621.7.044

В.В. ТРЕТЬЯК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## АЛГОРИТМ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

*В статье представлен алгоритм и пример его реализации для расчетов параметров технологических процессов импульсной штамповки. Решается ряд проблем, связанных с определением числа, вида и структуры устанавливаемых зарядов, определением местоположения установки и количества каждого вида заряда. Предложена методика для расчета операционной технологии для сложных деталей, которые необходимо штамповать с использованием специальных приемов. Представлена схема и алгоритм подбора аналога – схема его корректировки. Представлен пример программной реализации и результаты расчета для листовой детали.*

**Ключевые слова:** импульсная штамповка, структура установки зарядов, операционная технология, сложные листовые детали.

### Введение

При проектировании параметров импульсной технологии решается ряд проблем, связанных с определением числа, вида и структуры устанавливаемых зарядов, определением местоположения установки и количества каждого вида заряда. Значительное количество сложных деталей необходимо штамповать с применением специальных приемов. Следовательно, необходимо установить какова структура и вид каждого специального приема для всех переходов ТП.

К настоящему времени имеется достаточно много методик, посылок, советов для расчета количественных величин операционной технологии. Как правило, авторы этих методик используют баланс между энергией, необходимой для деформации заготовки и работоспособностью заряда. Однако, при этом из-за сложности счета процесс сводится к однопереходному, как правило, осесимметричному случаю, к тому же расчет ведется для единичного заряда. В реальности же используются достаточно сложные заряды, к тому же процесс ведется за несколько переходов.

### 1. К методике расчета операционной технологии

В литературе имеются достаточно конкретные рекомендации для определения оптимального местоположения установки заряда. Это, прежде всего материалы РТМ.

Этими советами технологи пользуются довольно широко и совершенно оправдано. Однако слож-

ность протекающих процессов для каждого уникального техпроцесса, различные побочные эффекты, влияющие на коэффициент полезного действия взрывчатых веществ, невозможность реализовать для большинства деталей однопереходную и однозарядную схему установки ВВ, противоречивость формул расчета, в виду того что они были получены для определенных конструкторско-технологических признаков затрудняют расчеты этих параметров, а для значительной доли деталей они просто неприемлемы. Поэтому была предложена методика расчета техпроцесса на уровне операционной технологии с учетом полного спектра знаний и данных с использованием синтеза по элементам ТП аналогов.

Суть ее сводится к следующему. В банке данных систем можно отыскать один либо несколько аналогов, имеющих наибольшее число дискретных элементов, рассчитанных на предшествующих этапах. Такими элементами являются вид заготовки, вид основной операции, передающая среда, состав элементов генеральной формы, наличие прогиба на торцевых поверхностях и внутри детали, элементы маршрутной технологии, тип используемого материала.

Используя различные режимы поиска по этим элементам, находим массив данных для отыскания наиболее приемлемого аналога. Используем методику отыскания “ближайшего соседа” и применим одну из наиболее известных формул по минимуму расстояния в многомерном пространстве признаков (рис. 1). В данном случае расстояние здесь понимается в обобщенном смысле: по определению расстояния в функциональном анализе, т.е. возможны его различные выражения, например:

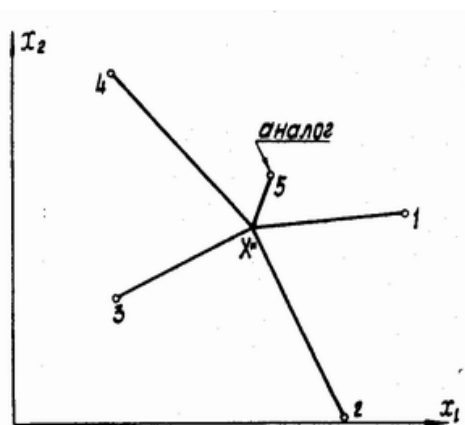


Рис. 1. Выбор ближайшего соседа для корректировки операционной технологии

евклидово расстояние:

$$\rho(X * al) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - al_i)^2};$$

расстояние по модулю разности координат:

$$\rho(X * al) = \sum_{i=1}^n |X_i - al_i|;$$

расстояние по углу:

$$\rho(X * al) = \arccos \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n X_i * al_i}{(|X_i| |al_i|)} \right\},$$

где  $X_i$  –  $i$ -я компонента  $X^*$ ;  $al$  –  $i$ -я компонента  $l$ -го эталона.

Выбор методики расчета производится по схеме, изображенной на рис. 2.



Рис. 2. Схема расчета параметров операционной технологии

## 2. Алгоритм расчета технологического процесса

На рис. 3 изображен алгоритм расчета импульсного ТП, состоящий из трех этапов проектирования.

На первом этапе производится выбор схемы процесса, на втором рассчитываются элементы маршрутной технологии (число переходов, темпооб-



Рис. 4. Алгоритм для разработки технологического процесса импульсной обработки

работки, наличие специальных приемов), на третьем параметры операционной технологии (вид, структура и величина зарядов). Структура установки зарядов на каждом переходе и специальные приемы устанавливаются по элементам аналога.

Производится расчет параметров по методикам для аналога, устанавливается наиболее приемлемая методика расчета или рекомендации. С учетом коэффициентов поправок рассчитываются все количественные параметры для зарядов на каждом переходе для каждого вида заряда.

После расчета оптимального варианта методом конечных разностей производится расчет напряженно-деформированного состояния заготовки на каждом переходе, затем уточняются некоторые технологические параметры до принятия окончательного решения.

Таким образом, данная методика учитывает практически все известные методы расчета количественных величин операционной технологии, учитывает практически все известные методы расчета количественных величин операционной технологии.

### 3. Программная реализация алгоритма

Данный алгоритм (рис. 3) реализован в виде программы, используемой для подбора аналога и расчета заряда для взрывной штамповки [1]. В данном случае расчет производился для листовой осе-

симметричной детали из стали толщиной 1 мм из материала 12Х18Н9, с габаритными размерами 700 мм. Геометрия детали представлена в виде абсолютных (рис. 4) и относительных параметров (рис. 5).

Из рис. 6 видно, что разброс численного значения заряда, рассчитанного по различным методикам и используемого на производстве может существенно меняться в зависимости от метода расчета.

Автор предлагает использовать данный алгоритм и методику расчета, как наиболее приспособленную и апробированную к реальным условиям производства.

|                             |                                |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
|-----------------------------|--------------------------------|--------|-----|--------------|----|--------------|--------|----------------|-----|------|
| Вид оси                     | прямолинейная ось              |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Вид контура                 | открытый                       |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Симметрия контура           | тело вращения                  |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Признак элемента            | 121                            |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Вид образующей              | без радиусов                   |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Вид рельефа в плане         | пуклевки круглые               |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Вид рельефа по расположению | наружный в недеформируемой зон |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Тип рельефа                 | без радиусов                   |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Точность контура            | 10-й качество                  |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Точность сопряжения         | совпадает с точностью контура  |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Тип материала               | железо (Fe)                    |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Толщина материала заготовки | 4                              |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Высота детали               | 200                            |        |     |              |    |              |        |                |     |      |
| Марка материала             | 12Х18Н10Т                      | SigmaS | 20  | SigmaB       | 55 |              | SigmaP | 40             | Ro  | 7900 |
| Alfa                        | 90                             | Bf     | 0   | LR1          | 0  |              | LR2    | 0              | AL1 | 0    |
| F                           | 0                              | Rf     | 0   | AL2          | 0  | Макс. прогиб | 0      | Радиус рельефа | 0   |      |
| F1                          | 100                            | D0     | 700 | Угол рельефа | 0  |              |        |                |     |      |
| F2                          | 100                            | B0     | 0   |              |    |              |        |                |     |      |
| L                           | 200                            | R0     | 0   |              |    |              |        |                |     |      |
| Lf                          | 100                            | R1     | 0   |              |    |              |        |                |     |      |
| D                           | 700                            | R2     | 0   |              |    |              |        |                |     |      |

Рис. 4. Конструкторско-технологические признаки осесимметричной листовой детали

|     |           |    |           |       |    |      |     |
|-----|-----------|----|-----------|-------|----|------|-----|
| H   | 0,2857142 | k  | 0         | b0    | 0  | AL1  | 180 |
| D   | 700       | t  | 0,0057142 | альфа | 90 | AL2  | 180 |
| d0  | 1         | f  | 0         | T мат | 4  | fr   | 0   |
| df  | 0         | f1 | 0,1428571 | 1/R1  | 0  | 1/Rr | 0   |
| del | 0         | f2 | 0,1428571 | 1/R2  | 0  | Alr  | 180 |

Рис. 5. Расчет относительных конструкторско-технологических параметров детали

|                           |         |                                              |         |
|---------------------------|---------|----------------------------------------------|---------|
| По формуле Пихтовникова   | 167,401 | Величина заводского заряда                   | 591,338 |
| По формуле Завьяловой     | 145,702 | Величина заряда по расчету без корректировки | 643,836 |
| По формуле Баранникова    | 144,078 | Реальное отклонение в %                      | 7,30605 |
| По формуле Еременко       | 323,397 | Козф. поправки для окончательных расчетов    | 0,93191 |
| По энергетической формуле | 643,836 | Величина заряда                              | 591,338 |
| Заводской заряд           | 600     | Высота установки заряда                      | 39      |

Рис. 6. Расчет и сравнение величины заряда по различным методикам расчета

**Литература**

1. Третьяк В.В. Математическая модель и расчет импульсных технологических процессов в

объектном представлении / В.В. Третьяк // Вісті академії інженерних наук. Спеціальний випуск. Машинобудування та прогресивні технології. 2009. – № 1 (38). – С. 126-133.

Поступила в редакцію 4.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедри В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**АЛГОРИТМ І ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ В РОЗРАХУНКАХ ПАРАМЕТРІВ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ**

**В.В. Третьяк**

В статті представлено алгоритм і приклад його реалізації для розрахунків параметрів технологічних процесів імпульсного штампування. Розв'язується ряд проблем, пов'язаних з визначенням числа, вигляду і структури встановлюваних зарядів, визначенням місцеположення установки і кількості кожного виду заряду. Запропонована методика для розрахунку операційної технології для складних деталей, які необхідно штампувати з використанням спеціальних прийомів. Представлена схема і алгоритм підбору аналога, схема його коректування. Наведено приклад програмної реалізації і результати розрахунку для листової деталі.

**Ключові слова:** імпульсне штампування, структура установки зарядів, операційна технологія, листові деталі.

**ALGORITHM AND ITS REALIZATION IN COMPUTATIONS OF PARAMETERS  
TECHNOLOGICAL PROCESSES OF IMPULSIVE STAMPING**

**V.V. Tretyak**

In article an algorithm is presented and example of its realization for computations of parameters of technological processes of the impulsive stamping. A row decides of the problems, related to the decision of number, kind and structure of the set charges, by the decision of site of installation and quantity of every type of charge. A method is offered for computation of operating technology for the difficult details, which it is necessary to stamp with the use of the special receptions. A chart is presented and algorithm of selection of analogue chart of its adjustment. An example is presented of program realization and results of computation for the sheet detail.

**Key words:** impulsive stamping, structure of installation of charges, operating technology, sheet details.

**Третьяк Владимир Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: mint\_khai@rambler.ru.

УДК 621.45.01

Д.Ю. КОНОВАЛОВА, И.А. АТАДЖАНОВ, М.М. КУДИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД

Приведены результаты разработки и испытания зонда для измерения скорости со встроенным микрочипом. У зонда изменено положение боковых приёмных отверстий и выбраны новые безразмерные комплексы давлений, организована одновременная регистрация давлений в трубках, давления в приёмных отверстиях преобразуются в электрические импульсы переменной длительности, измерение и вычисление вектора скорости в реальном времени производит микрочип. Эти особенности позволили упростить процесс градуировки, применить для него методы планирования эксперимента, повысить точность и уменьшить объем обработки информации при измерениях.

**Ключевые слова:** многоканальный пневмоприёмник, потенциометрический датчик, одновибратор, микрочип, факторный план.

### Введение

Несмотря на то, что пневмометрический способ измерения вектора скорости не нов и имеет свои существенные недостатки, он все ещё широко применяется при испытаниях ГТД, так как особенности более современных и точных методов затрудняют их применение в условиях эксплуатации двигателя. Так, например, лазерный доплеровский измеритель скорости [1] дорог и может использоваться только в специальных лабораториях, а термоанемометры нельзя использовать при больших скоростях потока. Интерес для практики представляет методика измерения вектора скорости неподвижным многоканальным зондом с предварительной градуировкой его в аэродинамической трубе. Она позволяет автоматизировать измерение вектора скорости с применением встроенного в зонд микрочипа.

### 1. Формулирование проблемы

При градуировке в аэродинамической трубе пятиканального зонда необходимо записать давления в его отверстиях и ресивере трубы для каждой комбинации углов установки при нескольких скоростях потока в трубе. Это требует длительной работы энергопотребляющего оборудования. В процессе измерения параметры потока в трубе не поддерживаются строго постоянными, что вносит дополнительную погрешность в результаты. При градуировке строится нелинейная поверхность отклика зонда, использовать которую при измерениях неудобно из-за громоздких формул, если измерения предполагается автоматизировать с применением 8-ми разрядного микроконтроллера.

### 2. Решение проблемы

Расположение приёмных отверстий и безразмерные комплексы давлений в них были выбраны таким образом, чтобы один из них (X1) линейно зависел только от угла тангажа а другой (X2) – от угла рыскания. На рис. 1 показано как изменилось расположение приёмных отверстий. При этом безразмерный комплекс давления для определения угла тангажа (X1) изменился так:

$$X1 = \frac{P_2 - P_3}{D} \rightarrow X1 = \frac{\frac{P_5 + P_2}{2} - \frac{P_4 + P_3}{2}}{D}$$

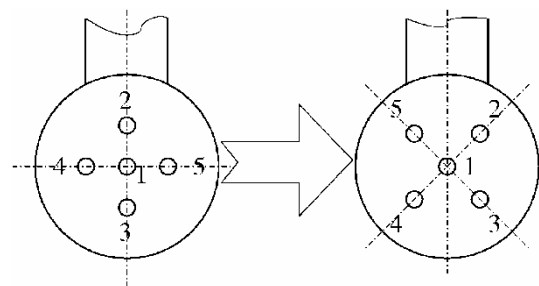


Рис. 1. Изменение расположения приёмных отверстий

На рис. 2 и 3 представлены диаграммы Парето для комплекса X1. На них видно, что для старого зонда статистически значимыми (при  $\alpha = 0,01$ , сплошная вертикальная линия) являются не только эффект тангажа, но и смешанные эффекты, в то время как для нового зонда – только эффект угла тангажа. Для комплекса X2 существенен только эффект угла рыскания для обоих зондов (рис. 4 и 5). Влия-

ние державки для старого зонда проявилось в нелинейности эффекта угла тангажа, показанной на рис. 6. Как видно из рис. 8 и 9 по углу рыскания и старый и новый зонд показали схожие результаты.

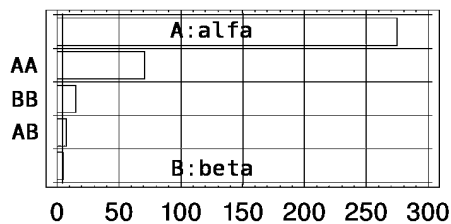


Рис. 2. Диаграмма Парето для параметра X1 старого зонда

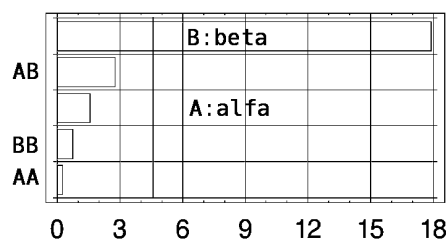


Рис. 3. Диаграмма Парето для параметра X1 нового зонда

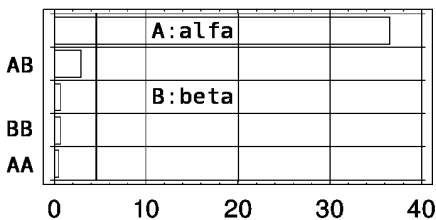


Рис. 4. Диаграмма Парето для параметра X2 старого зонда

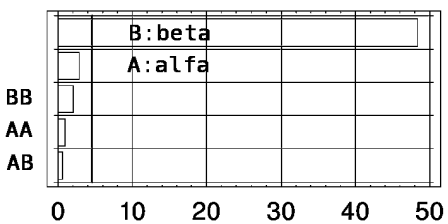


Рис. 5. Диаграмма Парето для параметра X2 нового зонда

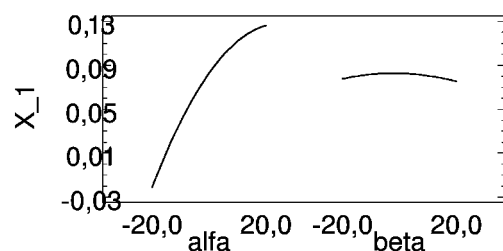


Рис. 6. Эффекты факторов для параметра X1 старого зонда

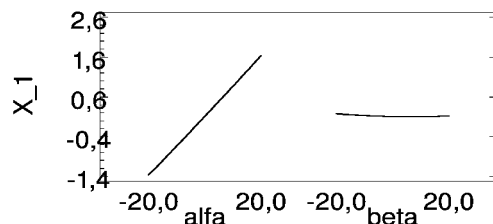


Рис. 7. Эффекты факторов для параметра X1 нового зонда

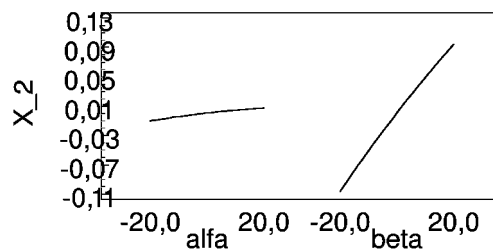


Рис. 8. Эффекты факторов для параметра X2 старого зонда

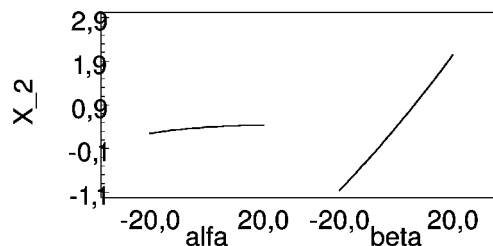


Рис. 9. Эффекты факторов для параметра X2 нового зонда

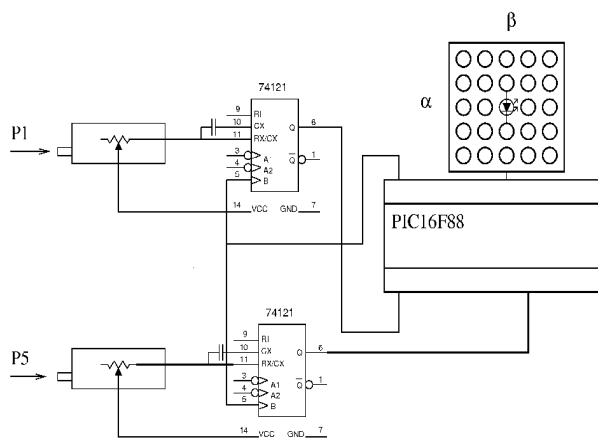


Рис. 10. Функциональная схема измерительной системы

Направление вектора скорости определяют два параметра (X1 и X2), каждый из которых почти линейно связан со своей компонентой угла потока. Для определения этих зависимостей применено планирование двухфакторного эксперимента с изменением каждого фактора на двух уровнях.

Для определения скорости важно, чтобы измерения давления производились одновременно. Была разработана измерительная система, работающая по принципу, изложенному в [2], в которой потенци-

метрические датчики давления включены как времязадающие элементы одновибраторов. Величина давления при этом представлялась в виде длительности электрического импульса на выходе одновибратора. Один датчик занимал один бит информации. Это дало возможность объединить выходные сигналы датчиков в пятибитное слово, считываемое с выходов одновибраторов микрочипом.

### Заключение

Разработан и опробован зонд для измерения вектора скорости воздушного потока со встроенным микрочипом. Выбор места расположения боковых отверстий зонда и соответствующих этому положению безразмерных комплексов давления позволил упростить градуировочные зависимости, сделать их линейными, что дало возможность использовать для

автоматизации измерений 8-ми разрядный микрочип. При градуировке это дало возможность применить планирование эксперимента, сократить время его проведения и повысить точность результатов.

### Литература

1. *Современные лазерные доплеровские измерители скорости (Вопросы теории и практической реализации)* / Г.А. Барило, Ю.Г. Ващенко и др. // *Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности*. – Новосибирск, 1977. – С. 43-69.
2. *Дубровский И.И. Устройство параллельного ввода аналоговой информации в микроЭВМ* / И.И. Дубровский, Л.Н. Финякин, В.В. Кафаров // *Микропроцессорные средства и системы*. – 1986. – № 5. – С. 81-83.

Поступила в редакцию 30.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗОНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЕКТОРУ ШВИДКОСТІ У ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ ГТД

*Д.Ю. Коновалова, І.А. Атаджанов, М.М. Кудін*

Надано результати розробки та випробування зонда для вимірювання вектору швидкості з вбудованим мікрочипом. У зонда змінено розташування бокових приймальних отворів та обрані нові безрозмірні комплекси тиску, організовано одночасну реєстрацію тиску в отворах, тиск у приймальних отворах перетворюється на електричні імпульси змінної тривалості, вимір та обчислення вектору швидкості у реальному часі виконує мікрочип. Ці особливості дозволили спростити процес градуїровки, застосувати методи планування експерименту а також підвищити точність та зменшити обсяг обробки інформації при вимірюванні.

**Ключові слова:** багатоканальний зонд, потенціометричний датчик, одновібратор, мікрочип, планування експерименту.

### THE PROBE WITH EMBEDDED MICROCHIP FOR GAS TURBINE FLOW PASSAGE VELOCITY VECTOR MEASUREMENTS

*D.U. Konovalova, I.A. Atajanov, M.M. Kudin*

There are velocity probe with embedded microchip development and testing results. The holes positions were changed and new pressure coefficients were proposed, the simultaneous registration of pressure in holes was organized, pressure in the holes is converted to electrical pulses with variable duration, the measurement and computation of the velocity vector was produced by the built-in microchip in real time. All these features simplify calibration, permit to apply experimental design methods for achieve more accuracy with less amount of information's processing in the measurements.

**Key words:** multi-hole probe, resistive sensor, monostable, microchip, experimental design.

**Коновалова Дарья Юрьевна** – студентка 4 курса факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Атаджанов Ибрагим Ахметджанович** – студент 5 курса факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ibragimkhai86@mail.ru.

**Кудин Михаил Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: shel@3g.ua.

УДК 621.43.056

Е.И. КИРИЛАШ, В.Е. КОСТЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ ОЦЕНОК ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГАЗА КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ (ОБЗОР)

*Выполнен анализ точности численных оценок перепада давления на жаровой трубе, распределения расхода воздуха по ее отверстиям и неравномерности температурного поля газа на выходе камер сгорания 20 газотурбинных двигателей, достигнутой различными авторами в исследованиях методами вычислительной аэрогидродинамики, выполненных в период 2001 – 2009 гг. Установлено, что целевые показатели точности, сформулированные Н. Mongia в 2001 г., достигнуты в единичных расчетах. Выявлена сильная зависимость точности численных оценок гидравлических параметров и неравномерности температурного поля газа на выходе камер сгорания от топологии и разрешения расчетных сеток.*

**Ключевые слова:** камера сгорания, перепад давления на жаровой трубе, распределение воздуха по отверстиям, температурное поле газа, численное моделирование, точность численных оценок.

### Введение

Интенсивное развитие авиации и теплоэнергетики ужесточает требования к газотурбинной технике. В связи с этим сложность проектирования газотурбинных двигателей (ГТД) возрастает. Среди различных подходов, применяемых к решению этой проблемы, важное место занимает вычислительная аэрогидродинамика (ВАГД). В последнее десятилетие усилия мирового сообщества исследователей в области газотурбинных приложений ВАГД направлены на достижение точности численных расчетов основных характеристик ГТД и его узлов, достаточной для их эффективного использования в непрерывном цикле проектирования, доводки и сопровождения эксплуатации изделий.

Камера сгорания (КС) – один из наиболее трудных в проектировании и доводке узлов ГТД. К числу важнейших показателей качества его работы относятся гидравлическое сопротивление, определяющее термодинамическую эффективность двигателя, и неравномерность температурного поля газа на выходе КС, влияющая на ресурс лопаток турбины и двигателя в целом. Повышение точности расчета этих характеристик – актуальная научная задача, имеющая большое практическое значение.

Температура элементарного объема газа на выходе КС зависит от всей истории его движения, начиная с выхода из компрессора. При прохождении камеры сгорания температура и состав газа меняются под влиянием процессов горения, теплообмена и перемешивания. Указанные процессы зависят от

распределения потоков воздуха внутри КС [1].

Традиционно вопросы распределения воздуха по отверстиям жаровой трубы (ЖТ) и формирования температурного поля газа на выходе КС при приемлемом уровне ее гидравлического сопротивления предварительно решаются одномерным гидравлическим расчетом «холодной» КС и окончательно – ее экспериментальной доводкой.

Трехмерный численный расчет внутрикамерных процессов потенциально позволяет обеспечить большую точность прогнозирования гидравлических характеристик, чем одномерный гидравлический расчет, поскольку он содержит меньше упрощающих допущений (прежде всего – в отношении размерности пространства). Численный расчет течения с горением позволяет определить температурное поле газа в КС (в том числе, в ее выходном сечении), формирующееся под воздействием множества факторов (рис. 1) [2].

На практике точность численных оценок того или иного параметра КС ограничивается располагаемыми вычислительными ресурсами, обеспечивающими разрешение расчетной сетки, совершенством используемых математических моделей (прежде всего – турбулентности, горения и смесеобразования) и вычислительных алгоритмов [3].

Систематические исследования влияния расчетных сеток, математических моделей и вычислительных алгоритмов на точность численных оценок показателей качества работы КС ГТД не выполнялись, а опубликованные данные разрознены.



Рис. 1. Факторы, влияющие на неравномерность температурного поля газа на выходе КС [2]

Цель настоящей работы состоит в выявлении точности численных оценок неравномерности температурного поля газа на выходе КС ГТД, перепада давления на ЖТ и распределения расхода воздуха по ее отверстиям, достигнутой различными авторами,

и ее связи с физико-математической постановкой решавшихся задач.

## 1. Результаты исследования

В 2001 г. Н. Mongia сформулировал целевые показатели точности численных оценок параметров диффузионных КС ГТД для методологии их проектирования, основанной на современных программах и моделях ВАГД, чтобы установить, насколько можно полагаться на этот подход [4]. Ниже дано сравнение показателей точности численных оценок параметров реальных КС, достигнутых различными авторами, с целевыми показателями точности Н. Mongia.

В табл. 1 сведены максимальные различия между численными и измеренными оценками показателей неравномерности поля температур на выходе КС, перепада давления на ЖТ и относительного расхода воздуха через отверстия ЖТ, полученные различными авторами, вместе с основными характеристиками тех из использованных ими численных моделей, которые показали наивысшую точность.

Таблица 1

Анализ численных и измеренных оценок

| № объекта | Источник    | Различия между численными и измеренными оценками параметра |                          |                       |                |             | Модель    |      |        |          |     |
|-----------|-------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-------------|-----------|------|--------|----------|-----|
|           |             | Абс.                                                       |                          |                       |                | Отн., %     |           |      |        |          |     |
|           |             | $\Theta_{i, \text{cp}}$                                    | $\Theta_{i, \text{max}}$ | $\Theta_{\text{max}}$ | $\delta p, \%$ | $\bar{G}_i$ | C         | T    | $Sc_t$ | $\Gamma$ | K   |
| 1         | [5]         | 0,53                                                       |                          |                       |                |             | 1,2 (гт)  | rke  |        | EDC      | dpm |
| 2         | [6]         | 0,03                                                       |                          | <b>0,02</b>           | 0,32           |             | 2,75 (гт) | rke  |        | LF       | dpm |
| 3         | [7]         | Кач.                                                       |                          |                       |                |             |           | RANS |        | Да       | dpm |
| 4         | [8]         |                                                            |                          |                       | <b>0,19</b>    | 6,8*        | 6,0 (гт)  | rke  |        | FRED     | –   |
| 5         | [9]         |                                                            |                          |                       |                | 72          | 0,33 (гт) | ske  |        | Нет      | Нет |
| 6         | [10], [11]  |                                                            |                          |                       |                | <u>5,85</u> | 1,9 (гт)  | LES  |        | LFPV     | dpm |
| 7         |             |                                                            |                          |                       |                | 10,3        | 1,9 (гт)  | LES  |        | Нет      | Нет |
| 8         | [12]        |                                                            |                          |                       | 0,39           |             | 1,65 (гт) | ske  |        | PDF      | dpm |
| 9         | [13], [14]  |                                                            |                          | 0,05                  |                |             | 2,5 (г)   | RNG  | 0,2    | LF       | dpm |
| 10        | [15]        |                                                            |                          |                       | 0,98           |             | 8,7 (т)   | RNG  |        | Нет      | Нет |
| 11        | [16] – [18] |                                                            |                          |                       | 1,09           | 10,3        | 1,8 (гт)  | LES  |        | Нет      | Нет |
| 12        |             |                                                            |                          |                       | 0,30           | 18,9        | 1,8 (гт)  | RANS |        | Нет      | Нет |
| 13        | [19]        |                                                            |                          |                       | <b>0,13</b>    | 15          | 2,5 (т)   | ske  | 0,2    | FRED     | dpm |
| 14        | [20]        |                                                            |                          |                       | <b>0,05</b>    |             | 2,5 (т)   | ske  | 0,2    | FRED     | dpm |
| 15        | [21], [22]  |                                                            | 0,10                     | <b>0,02</b>           | Кач.           |             | 0,16 (к)  | ske  | 0,25   | FRED     | пар |
| 16        | [23]        |                                                            |                          |                       | 1,47           | 70,5        | 0,09 (к)  | ske  |        | Нет      | Нет |
| 17        | [24]        | 0,14                                                       |                          |                       |                |             | 0,35 (к)  | ske  | 0,5    | PDF      | dpm |
| 18        | [25], [26]  |                                                            | <b>0,03</b>              | 0,05                  |                |             | 1,0 (гт)  | ske  | 0,85   | PDF      | dpm |
| 19        | [27], [28]  |                                                            |                          |                       |                | 16,5        | 0,5 (т)   | ske  |        | Нет      | Нет |
| 20        | [29], [30]  | Кач.                                                       |                          |                       |                |             | 1,55 (т)  | LES  |        | DTF      | –   |
| Цель      | [4]         | <b>±0,015</b>                                              | <b>±0,03</b>             | <b>±0,03</b>          | <b>±0,25</b>   |             |           |      |        |          |     |

Сокращения: Абс. – абсолютные; Отн. – относительные; Кач. – качественно; C – сетка (млн. ячеек); гт – гексаэдры и тетраэдры; г – гексаэдры; т – тетраэдры; к – картографическая; T – турбулентность;  $Sc_t$  – турбулентное число Шмидта;  $\Gamma$  – горение; K – капли; rke – Realizable k-ε; ske – Standard k-ε; RNG – RNG k-ε; RANS – осреднение по Рейнольдсу; LES – моделирование крупных вихрей; PDF – модель не перемешанной смеси с равновесной химией; EDC – модель концепции разрушения вихря Магнуссена; LF – модель не перемешанной смеси с ламинарными флеймлетами; FRED – модель Магнуссена – Хертагера (конечноскоростная химия + модель разрушения вихря); LFPV – модель частично перемешанной смеси (ламинарные флеймлеты + модель Зимонта); DTF – модель динамически утолщающегося пламени; dpm – лагранжева модель капель. Обозначения: \* – различие между оценками, полученными в численном и гидравлическом расчетах; подчеркивание – лучший результат; курсив – худший результат; жирный шрифт – достигнут целевой показатель точности Н. Mongia (2001 г.)

Краткая характеристика объектов численного моделирования, место и время его выполнения и использованный компьютерный код приведены в табл. 2.

Таблица 2

Краткая характеристика объектов численного моделирования,

| № объекта | Двигатель | Тип КС                  | Страна   | Год  | Код      |
|-----------|-----------|-------------------------|----------|------|----------|
| 1         | GTC       | Кольцевая               | Китай    | 2009 | Fluent   |
| 2         | Kaveri    | Кольцевая               | Индия    | 2009 | Fluent   |
| 3         | SAC       | Кольцевая               | Германия | 2008 | Fluent   |
| 4         | MS7001    | Трубчатая противоточная | Китай    | 2006 | Fluent   |
| 5         | MS5001    | Трубчатая противоточная | Италия   | 2006 | Fluent   |
| 6         | PW6000    | Кольцевая               | США      | 2005 | CDP      |
| 7         | PW6000    | Кольцевая               | США      | 2005 | CDP      |
| 8         | TFE731    | Кольцевая противоточная | США      | 2004 | Fluent   |
| 9         | ПС-90А    | Трубчато-кольцевая      | Россия   | 2004 | CFX      |
| 10        | Kaveri    | Кольцевая               | Индия    | 2004 | Fluent   |
| 11        | PW6000    | Кольцевая               | США      | 2003 | CDP      |
| 12        | PW6000    | Кольцевая               | США      | 2003 | Allstar  |
| 13        | PW6000    | Кольцевая               | США      | 2001 | Allstar  |
| 14        | PW4098    | Кольцевая               | США      | 2001 | Allstar  |
| 15        | Kaveri    | Кольцевая               | Индия    | 2001 | ANSWER   |
| 16        | Kaveri    | Кольцевая               | Индия    | 2001 | PHOENICS |
| 17        | BR710     | Кольцевая               | Германия | 2008 | FASTEST  |
| 18        | T56       | Трубчато-кольцевая      | ЮАР      | 2007 | Fluent   |
| 19        | ГТД       | Трубчатая               | ЮАР      | 2006 | Fluent   |
| 20        | ARRIUS    | Кольцевая противоточная | Франция  | 2006 | AVBP     |

Средний и максимальный относительные подогревы газа в  $i$ -м поясе замера определялся по формулам соответственно

$$\Theta_{i,cp} = (T_{i,cp} - T_k) / (T_r - T_k), \quad (1)$$

$$\Theta_{i,max} = (T_{i,max} - T_k) / (T_r - T_k), \quad (2)$$

где  $T_{i,cp}$  и  $T_{i,max}$  – средняя и максимальная температуры газа в  $i$ -м поясе замера соответственно;  $T_k$  – средняя температура воздуха на входе в КС;  $T_r$  – средняя температура газа на выходе КС.

Максимальная неравномерность температурно-го поля газа определялась по формуле

$$\Theta_{i,max} = (T_{max} - T_k) / (T_r - T_k), \quad (3)$$

где  $T_{max}$  – максимальная температура газа в выходном сечении КС.

Относительный перепад давления на ЖТ определялся по формуле

$$\delta p = (p_k - p_r) / p_k \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $p_k$  и  $p_r$  – давления на входе и на выходе КС соответственно.

Относительный массовый расход воздуха через  $i$ -е отверстие ЖТ вычислялся по формуле

$$\bar{G}_i = G_i / G_b \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $G_i$  – массовые расходы воздуха через  $i$ -е отверстие и через все отверстия ЖТ соответственно.

Абсолютное и относительное различия между численной и измеренной оценками параметра КС определялись по формулам соответственно

$$\Delta_\varphi = \varphi_c - \varphi, \quad (6)$$

$$\delta_\varphi = \Delta_\varphi / \varphi \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где  $\varphi_c$  и  $\varphi$  – численная и измеренная оценки параметра КС соответственно.

Из табл. 1 и 2 видно следующее.

1. Максимальные абсолютные ( $\Delta$ ) и относительные ( $\delta$ ) различия между численными и измеренными оценками параметров КС, достигнутые различными авторами, находятся в следующих пределах:  $\Delta_{\Theta_{i,cp}} = 0,03...0,53$  % абс.;  $\Delta_{\Theta_{i,max}} = 0,03...0,14$  % абс.;  $\Delta_{\Theta_{max}} = 0,02...0,14$  % абс.;  $\Delta_{\delta p} = 0,05...1,47$  % абс.;  $\delta_{\bar{G}_i} = 5,85...72$  % отн.

2. Ни одна из рассмотренных численных моделей не обеспечивает максимальную точность одновременно по всем параметрам КС.

3. Ни одна из рассмотренных численных моделей не удовлетворяет целевому показателю точности Н. Mongia по абсолютному различию между численными и измеренными оценками параметра  $\Theta_{i,cp}$  ( $\pm 0,015$ ). Наилучший результат по этому параметру достигнут в исследовании объекта № 2 (0,03).

4. Целевому показателю точности Н. Mongia по абсолютному различию между численными и измеренными оценками параметра  $\Theta_{i,max}$  ( $\pm 0,03$ ) удовлетворяет единственная рассмотренная численная модель – объекта № 18 (0,03).

5. Целевому показателю точности Н. Mongia по абсолютному различию между численными и измеренными оценками параметра  $\Theta_{max}$  ( $\pm 0,03$ ) удовлетворяют две рассмотренные численные модели: объект № 2 (0,02) и объект № 15 (0,02).

6. Целевому показателю точности Н. Mongia по абсолютному различию между численными и измеренными оценками параметра  $\delta p$  ( $\pm 0,25$  % абс.) удовлетворяют три численные модели из 10: объект № 14 (0,05 % абс.), объект № 13 (0,13 % абс.) и объект № 4 (0,19 % абс.).

7. Наилучшие результаты по относительному различию между численными и измеренными оценками параметра и  $\bar{G}_i$  достигнуты в исследованиях объектов № 6 (5,85 % отн.) и № 4 (6,8 % отн.).

8. Расчеты объектов № 1 – 16 выполнены в постановке, предусматривавшей охват расчетной областью одnogорелочного сектора всей КС, включая диффузор, кольцевые каналы (КК) и ЖТ, расчеты остальных объектов – в постановке, предусматривавшей охват расчетной областью только одnogорелочного сектора ЖТ. Связь между годом исследования и постановкой в выборе расчетной области не прослеживается.

9. В 10 численных моделях использовались гибридные расчетные сетки, в 5 – тетраэдрические, в 4 – гексаэдрические (в 3 из них – картографические). Прослеживается связь между годом исследования и топологией и размером сетки: в ранних исследованиях – это картографические сетки с количеством ячеек несколько сотен тысяч, в последних исследованиях – это, как правило, гибридные сетки с количеством ячеек порядка 2 млн. и более.

Прослеживается устойчивая связь между размером расчетной сетки и точностью численных оценок перепада давления на ЖТ  $\delta p$  (рис. 2, а) и относительного массового расхода воздуха через отверстия ЖТ  $\bar{G}_i$  (рис. 2, б).

10. Подавляющее большинство исследований (16 из 20) выполнено в постановке RANS.

Во всех объектах, моделировавшихся в постановке RANS, использовались дифференциальные модели турбулентности семейства k- $\epsilon$ .

Прослеживается связь между годом исследования и используемой моделью турбулентности: в ранних исследованиях – это стандартная k- $\epsilon$  модель, в последнем пятилетии – RNG и Realizable модели.

В 5 численных моделях из 13 использовалось уменьшенное значение турбулентного числа Шмидта по сравнению с его стандартным значением  $Sc_t = 0,85$ .

11. Связь между годом исследования и используемой моделью горения не прослеживается.

Все расчеты с горением, кроме одного объекта № 18, выполнены без учета лучистого теплообмена.

12. Распыленное жидкое топливо моделировалось как полностью испаренное в единственной численной модели из объекта № 15. В остальных 10 численных моделях объектов с горением распылен-

ного топлива капли моделировались в лагранжевой постановке.

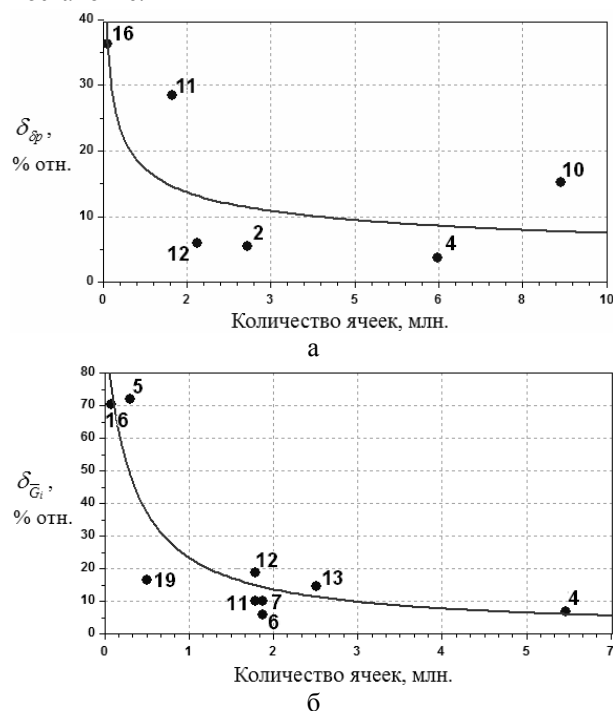


Рис. 2. Корреляция между количеством ячеек расчетной сетки и максимальным относительным различием численных и измеренных оценок параметров  $\delta p$  (а) и  $\bar{G}_i$  (б). Номера объектов соответствуют табл. 1 и 2

## Заключение

На основании выполненного выше анализа можно сделать следующие выводы.

1. Целевые показатели точности, сформулированные Н. Mongia в 2001 г., сохраняют свою актуальность до настоящего времени: за истекшее десятилетие их удалось достичь в единичных численных расчетах КС.

2. В численных расчетах показателей качества работы КС большой прогресс достигнут в точности численных оценок перепада давления на ЖТ и распределения расхода воздуха по ее отверстиям, меньший – в точности численных оценок неравномерности температурного поля газа на выходе.

3. Из всех аспектов физико-математической постановки задач наиболее явно прослеживается зависимость точности численных оценок гидравлических параметров и параметров неравномерности температурного поля газа на выходе КС от топологии и разрешения расчетных сеток.

4. Хотя причинно-следственная связь неравномерности температурного поля газа на выходе КС с ее аэродинамикой очевидна, количественную связь между точностью численных оценок гидравлических параметров и точностью численных оценок

параметров неравномерности температурного поля газа на выходе КС установить не удалось вследствие недостатка данных.

### Литература

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. Kotzer C. *Effects of Combustion Chamber Geometry upon Exit Temperature Profiles* / C. Kotzer, M. LaViolette, W. Allan // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*. – Orlando, Florida, USA.. June 8-12, 2009 (GT2009-60156). – 9 p.
3. Оран Э. Численное моделирование реагирующих потоков / Э. Оран, Дж. Борис. – М.: Мир, 1990. – 663 с.
4. Mongia H.C. *A Synopsis of Gas Turbine Combustor Design Methodology Evolution of Last 25 Years* / H.C. Mongia // *XV ISABE*. – Bangalore, India. September 3-7, 2001 (ISABE-2001-1086). – 19 p.
5. Wang F. *Gas Turbine Combustor Simulation with Various Turbulent Combustion Models* / F. Wang, Y. Huang, T. Deng // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*. – Orlando, Florida, USA.. June 8-12, 2009 (GT2009-59198). – 12 p.
6. Srinivasa Rao M. *Performance Improvement of an Aero Gas Turbine Combustor* / M. Srinivasa Rao, G. Sivaramakrishna // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*. – Orlando, Florida, USA., June 8-12, 2009 (GT2009-59928). – 8 p.
7. *Development of Lean-Burn Low-NOx Combustion Technology at Rolls-Royce Deutschland* / W. Lazik, Th. Doerr, S. Bake, R.V.D. Bank, L. Rackwitz // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*. – Berlin, Germany. June 9-13, 2008 (GT2008-51115). – 11 p.
8. *The Effects of Pressure on Gas Turbine Combustor Performance an Investigation Via Numerical Simulation* / Y. Cui, G. Xu, B. Yu, Ch. Nie, W. Huang // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2006*. – Barcelona, Spain. May 8-11, 2006 (GT2006-90635). – 8 p.
9. *CFD Simulations for the Development of Gas Turbine Low-NOx Hydrogen Combustor* / J. Riccardi, P. Gheri, G. Giorgiani, M. Schiavetti, G. Gigliucci // *Proceedings of WHEC*. – Lyon, France. June 13-16, 2006.
10. *A New Paradigm for Simulation of Turbulent Combustion in Realistic Gas Turbine Combustors Using LES* / G. Constantinescu, K. Mahesh, S. Apte, G. Iaccarino, F. Ham, P. Moin // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003*. – Atlanta, Georgia, USA.. June 16-19, 2003 (GT2003-38356).
11. *Large-Eddy Simulation of Reacting Turbulent Flows in Complex Geometries* / K. Mahesh, G. Constantinescu, S. Apte, G. Iaccarino, F. Ham, P. Moin // *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*. – 2006. – Vol. 73. – P. 374-381.
12. Dudebout R. *Integrated Process for CFD Modeling and Optimization of Gas Turbine Combustors* / R. Dudebout, B. Reynolds, K. Molla-Hosseini // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*. – Vienna, Austria. June 14-17, 2004 (GT2004-54011).
13. Куценко Ю.Г. Применение численных методов газовой динамики для расчета камеры сгорания газотурбинного двигателя ПС-90А / Ю.Г. Куценко // *Изв. вузов. Авиационная техника*. – 2004. – № 3. – С. 67-71.
14. Koutsenko I.G. *Application of CFD-Based Analysis Technique for Design and Optimization of Gas Turbine Combustors* / I.G. Koutsenko, S.F. Onegin, A.M. Sipatov // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*. – Vienna, Austria. June 14-17, 2004 (GT2004-53398).
15. Ananda Reddy G. *Non-reacting Flow Analysis from Combustor Inlet to Outlet using Computational Fluid Dynamics Code* / G. Ananda Reddy, V. Ganesan // *Defence Science Journal*. – 2004. – Vol. 54, № 4 (October). – P. 455-467.
16. *2002 Annual Technical Report / Center for Integrated Turbulence Simulations in collaboration with the Computer Systems Laboratory*. – Stanford University. – 2002.
17. *Progress toward large-eddy simulation of turbulent reacting and non-reacting flows in complex geometries* / K. Mahesh, G. Constantinescu, S. Apte, G. Iaccarino, F. Ham, P. Moin // *Annual Research Briefs. Center for Turbulence Research*. – 2002. – P. 115-141.
18. Mahesh K. *Simulating Turbulent Flows In Complex Geometries* / K. Mahesh, G. Constantinescu, P. Moin // *Proceedings of FEDSM. 4th ASME JSME Joint Fluids Engineering Conference*. – Honolulu, Hawaii, USA.. July 6-11, 2003 (FEDSM2003-45337).
19. *Application Of An Advanced CFD-Based Analysis System To The PW6000 Combustor To Optimize Exit Temperature Distribution – Part II: Comparison Of Predictions To Full Annular Rig Test Data* / T.S. Snyder, J.F. Stewart, M.D. Stoner, G. Randal, R.G. McKinney // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001*. – New Orleans, Louisiana. June 4-7, 2001 (2001-GT-0064).
20. *Application Of An Advanced CFD-Based Analysis System to The PW6000 Combustor To Optimize Exit Temperature Distribution – Part I: Description And Validation Of The Analysis Tool* / R.E. Malacki, Ch.M. Rhie, R.G. McKinney, H. Ouyang, S.A. Syed, M.B. Colket, R.K. Madabhushi // *Proceedings of ASME TurboExpo 2001*. – New Orleans, Louisiana. June 4-7, 2001 (2001-GT-0062).
21. *CFD Modeling Of The Aero Gas Turbine Combustor* / G. Sivaramakrishna, Sh. Venkataraman, N. Muthuveerappan, T.K. Sampathkumaran // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001*. – New Orleans, Louisiana. June 4-7, 2001 (2001-GT-0063).
22. *Combustor Geometry Optimization Studies Using CFD Technique* / G. Sivaramakrishna, N. Muthuveerappan, V. Shankar, T. K. Sampathkumaran // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001*. New Orleans, Louisiana. June 4-7, 2001 (ISABE-2001-1089).
23. *Cold Flow Analysis of an Aero-Engine Gas Turbine Combustor Configuration* / H.S. Muralidhara, T.R. Shembharkar, B.R. Pai, P.S. Ramanujam, G.N. Jayaprakash, P.K. Pandey // *Papers of 15th Inter-*

*national Symposium on Air Breathing Engines (XV ISABE). – Bangalore, India. September 3-7, 2001 (ISABE-2001-1233).*

24. Chrigui M. Numerical Analysis of Spray Dispersion, Evaporation and Combustion in a Single Gas Turbine Combustor / M. Chrigui, A. Sadiki, J. Janicka // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008. – Berlin, Germany. June 9-13, 2008 (GT2008-51253).*

25. Van Niekerk J.E. Prediction of the T56 Turbine Inlet Temperature Profile with an Abnormal Fuel Distribution / J.E. Van Niekerk, C.J. Meyer, R.M. Morris // *Papers of XVII International Symposium on Air Breathing Engines (XVII ISABE). – Munich, Germany. September 4-9, 2005 (ISABE-2005-1229).*

26. Gouws J.J. Modelling of a Gas Turbine Combustor Using a Network Solver / J.J. Gouws, R.M. Morris, J.A. Visser // *South African Journal of Science. – 2006. – Vol. 102 (November/December) – P. 533-536.*

27. An Efficient Strategy For The Design Optimization Of Combustor Exit Temperature Profile / O.S. Motsamai, J. A. Visser, M. Morris, D. J. de Kock // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. – Barcelona, Spain. May 8-11, 2006 (GT2006-91325).*

28. Pretorius J. J. A Network Approach for the Prediction of Flow and Flow Splits within a Gas Turbine Combustor: MSc. Dissertation / J. J. Pretorius // *University of Pretoria. – Pretoria, 2005.*

29. Large Eddy Simulation of Two-Phase Reacting Flows / B. Cueno, M. Boileau, S. Pascaudy, J.-B. Mossa, E. Riber, T. Poinso, C. Bérat // *European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS. CFD 2006. – Delft, Netherlands. – 2006. – 19 p.*

30. Toward LES of an Ignition Sequence in a Full Helicopter Combustor / M. Boileau, J.B. Mossa, B. Cuenot, T. Poinso, D. Bissières, C. Bérat // *Report TR/CFD/05/72. – 2005. – 8 p.*

Поступила в редакцию 19.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

#### АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ЧИСЛОВИХ ОЦІНОК ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І НЕРІВНОМІРНОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГАЗА КАМЕР ЗГОРЯННЯ ГТД ЗАСОБАМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ АЕРОГІДРОДИНАМІКИ (ОГЛЯД)

*О.І. Кирилаш, В.Є. Костюк*

Виконано аналіз точності числових оцінок перепаду тиску на жаровій трубі, розподілу витрати повітря по її отворам і нерівномірності температурного поля газу на виході камер згоряння 20 газотурбінних двигунів, досягнутої різними авторами в дослідженнях засобами обчислювальної аерогідродинаміки, виконаних у період 2001 – 2009 рр. Встановлено, що цільові показники точності, сформульовані Н. Mongia у 2001 р., досягнуті в одиничних розрахунках. Виявлена сильна залежність точності числових оцінок гідравлічних параметрів і нерівномірності температурного поля газу на виході камер згоряння від топології й розділення розрахункових сіток.

**Ключові слова:** камера згоряння, перепад тиску на жаровій трубі, розподіл повітря по отворам, температурне поле газу, числове моделювання, точність числових оцінок.

#### ACCURACY ANALYSIS OF GAS TURBINE ENGINE COMBUSTORS HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND GAS TEMPERATURE FIELD NONUNIFORMITY NUMERICAL EVALUATIONS BY CFD METHODS (REVIEW)

*Ye.I. Kirilash, V.Ye. Kostyuk*

The accuracy analysis of pressure drop across flame tube, flame tube orifices mass flow rate distribution and exit gas temperature field nonuniformity numerical evaluations of the 20 gas turbine engine combustors attained by different authors with the help of CFD methods in researches realized at 2004 – 2009 is performed. It was ascertained that goal accuracy indices formulated by H. Mongia at 2001 were attained only in isolated calculations. The hydraulic parameters and combustor exit gas temperature field nonuniformity numerical evaluations accuracy dependence on the computational grids topology and resolution is ascertained.

**Key words:** combustor, pressure drop across flame tube, orifices mass flow rate distribution, gas temperature field, numerical simulation, numerical evaluations accuracy.

**Кирилаш Елена Ивановна** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

**Костюк Владимир Евгеньевич** – канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

УДК 621.577

Р.Н. РАДЧЕНКО, Н.Я. ХЛОПЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СБРОСНОГО ТЕПЛА МАЛООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

*Проанализировано использование теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха судовых малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров теплоиспользующими холодильными машинами. Рассчитаны величины снижения температуры воздуха, достижимые исходя из располагаемой сбросной теплоты при разных тепловлажностных условиях на входе. Определены границы эффективного применения комплексной утилизации сбросной теплоты малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров.*

**Ключевые слова:** малооборотный дизель, утилизация теплоты, охлаждение воздуха, термотрансформатор, низкокипящее рабочее тело.

### Анализ проблемы и постановка цели исследования

Основным направлением повышения экономичности дизельных установок (ДУ) является утилизация теплоты вторичных энергоресурсов (ВЭР): уходящих газов, наддувочного воздуха и охлаждающей дизели воды. Тепловой потенциал уходящих газов малооборотных дизелей (МОД) характеризуется сравнительно невысокой их температурой после турбокомпрессора (ТК), 250...280 °С, что ограничивает возможности его утилизации. Поэтому в традиционных системах утилизации с производством пара в утилизационных пароводяных котлах (УК) предпочтение отдают комплексному использованию теплоты уходящих газов (в испарительной секции УК) и наддувочного воздуха (подогрев питательной воды в экономайзерной секции УК).

Наиболее перспективными считаются турбокомпаундные системы утилизации (ТКС) с паровой турбиной (ПТ), приводящей гребной вал или электрогенератор. Утилизационная ПТ образует единый энергоиспользующий комплекс с дополнительной газовой турбиной (ГТ), утилизирующей энергию уходящих газов и установленную на байпасной линии в обход основной ГТ ТК. Дополнительная мощность, получаемая в ТКС, составляет 8...11% мощности дизеля, что равнозначно повышению КПД на 4,0...5,5% [1, 2]. Однако применение ТКС для МОД мощностью менее 20 МВт нецелесообразно, поскольку срок их окупаемости превышает 12 лет [2].

Не решена также проблема ухудшения экономичности МОД при повышенных температурах воздуха  $t_{\text{нв}}$  на входе ТК, следствием чего является увеличение удельного расхода топлива на 0,5...0,6 % на

каждые 10 °С повышения  $t_{\text{нв}}$  [1, 2]. Поскольку с увеличением  $t_{\text{нв}}$  возрастают потери теплоты с уходящими газами, то целесообразно использовать их теплоту для охлаждения воздуха на входе.

**Цель работы** – определение границ целесообразности использования сбросной теплоты МОД для охлаждения воздуха на входе.

### Результаты исследования

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются эжекторные термотрансформаторы (ЭТТ) на низкокипящих рабочих телах (НРТ), в которых функцию компрессора выполняет эжектор [3]. Применение НРТ позволяет утилизировать теплоту ВЭР низкого температурного уровня и избежать необходимости поддержания вакуума в испарителе – охладителе воздуха (И-ВО). Эффективность ТТ характеризуется тепловым коэффициентом  $\zeta$ , который представляет собой отношение  $\zeta = Q_0/Q_r$  холодопроизводительности  $Q_0$  (теплоты, отведенной от воздуха на входе дизеля к НРТ, кипящему в И-ВО при низких давлении и соответственно температуре) к теплоте  $Q_r$ , подведенной к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов или других ВЭР. Для ЭТТ на хладагтах R142B, R600, R600a, R290 значение  $\zeta$  небольшое и составляет 0,2...0,3. Поэтому для увеличения глубины охлаждения воздуха на входе ТК и соответственно повышения экономичности МОД целесообразно задействовать другие, помимо уходящих газов, ВЭР (наддувочный воздух, охлаждающую воду), т.е. прибегать к комплексному использованию ВЭР МОД.

Схемы ДУ с ЭТТ, использующими теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха для охлаж-

дения воздуха на входе, приведены на рис. 1 [3]. Генератор паров НРТ высокого давления целесообразно включать в пароконденсатную систему УК (рис. 1, а), т.е. использовать водяной пар в качестве промежуточного теплоносителя. Это обеспечивает безопасность эксплуатации ДУ с ЭТТ и работу ДУ по когенерационному циклу – с производством теп-

ловой энергии в холодное время и холода в теплое время. При этом генератор НРТ является одновременно конденсатором водяного пара. С целью упрощения в схеме ДУ с утилизацией теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха на рис. 1, б промежуточный пароводяной контур УК не показан.

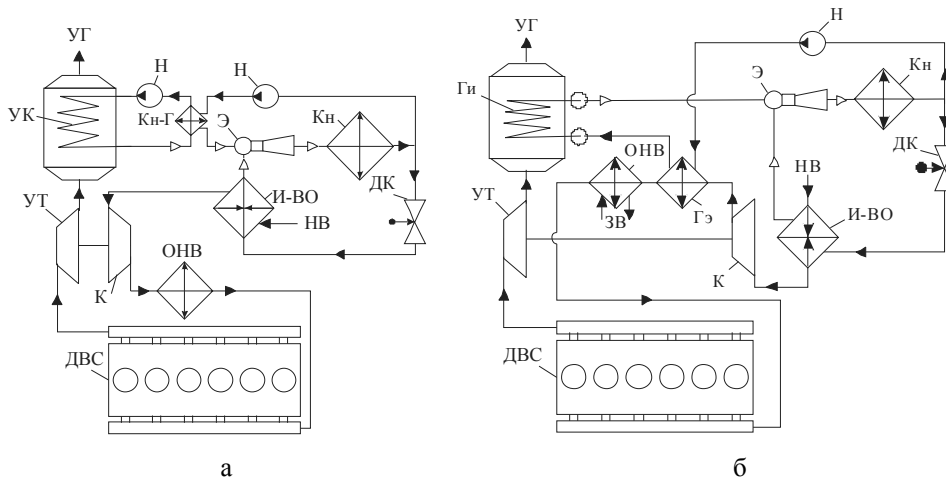


Рис. 1. Схемы ДУ с ЭТТ, использующими теплоту уходящих газов (а), газов и наддувочного воздуха (б) для охлаждения воздуха на входе МОД:

Кн-Г – конденсатор водяного пара-генератор паров НРТ; Г<sub>э</sub> и Г<sub>и</sub> – экономайзерная и испарительная секции генератора; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; К – компрессор ТК; УТ – утилизационная газовая турбина ТК; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы; ЗВ – забортная вода

В общем случае генератор паров НРТ высокого давления состоит из двух секций: экономайзерной и испарительной. В экономайзерной секции происходит нагрев жидкого НРТ от температуры конденсации  $t_k$  до температуры кипения  $t_r$  при высоком давлении, в испарительной – кипение жидкого НРТ с образованием паров высокого давления, являющихся силовым потоком в эжекторе. Тепловые нагрузки испарительной и экономайзерной секций соотносятся между собой как теплота фазового перехода НРТ в испарительной секции при температуре кипения  $t_r$  и теплота нагрева жидкого НРТ от  $t_k$  до  $t_r$  в экономайзерной секции. При максимально допускаемой (из условия термической стойкости НРТ) температуре кипения  $t_r = 120^\circ\text{C}$  тепловые нагрузки испарительной и экономайзерной секций примерно равны между собой, т.е. использование в экономайзерной секции дополнительного источника теплоты, например наддувочного воздуха (рис. 1, б), удваивает холодопроизводительность ЭТТ. Экономайзерную секцию целесообразно включать в контур пресной воды высокотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (на рис. 1, б не показано).

Наружный воздух подают на вход ТК МОД двумя способами: вентиляторами системы вентиляции машинного отделения (МО) непосредственно в

зону ТК (подача воздуха из МО) и отдельным воздуховодом. В первом случае температура воздуха на  $10^\circ\text{C}$  выше температуры наружного воздуха, во втором – на  $5^\circ\text{C}$  [1]. Второй способ считается более перспективным и применяется на судах современной постройки.

На рис. 2 в диаграмме d-I (влажность-удельная энтальпия) влажного воздуха показаны процессы охлаждения воздуха в И-ВО на входе ТК при первом способе подачи воздуха (из МО), его относительной влажности  $\phi_1 = 70\%$  и температурах на входе в И-ВО  $t_{b1} = 25; 30$  и  $35^\circ\text{C}$  (соответственно температурах наружного воздуха  $15; 20$  и  $25^\circ\text{C}$ ). Параметры воздуха на выходе из И-ВО:  $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$  и  $\phi_2 = 98 \dots 100\%$ .

Направление процесса А-Б охлаждения влажного воздуха в диаграмме d-I определяется коэффициентом влаговываждения  $\xi$ , который представляет собой отношение полного количества теплоты, отведенной от влажного воздуха в охладителе, к явному, определяемому разностью температур по сухому термометру:  $\xi = (I_{b1} - I_{b2}) / [c_{вл} \cdot (t_{b1} - t_{b2})] = (I_A - I_B) / [c_{вл} \cdot (t_A - t_B)]$ ;  $c_{вл}$  – теплоемкость влажного воздуха  $c_{вл} = 1,01 + 1,89d$ ; d – влагосодержание, кг/кг;  $t_{b1}$  и  $t_{b2}$  – температуры воздуха на входе и выходе из охладителя по сухому термометру;  $I_{b1}$  и  $I_{b2}$  – энтальпии влажного

воздуха на входе и выходе из охладителя,  $I_B = c_{\text{вЛ}} \cdot t_B + 1,89d$ , кДж/кг.

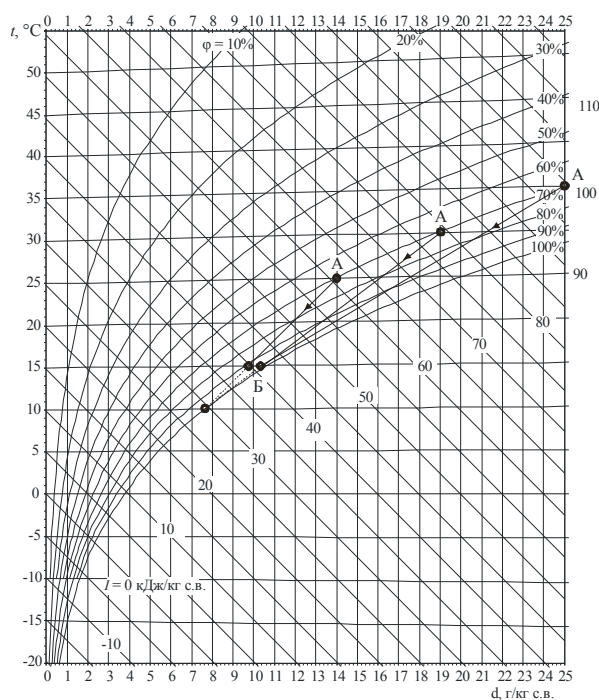


Рис. 2. Процессы охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК:

А – воздух на входе охладителя; Б – воздух на выходе; А-Б – охлаждение воздуха в охладителе

Так, при неизменной  $\phi_1 = 70\%$  процессу охлаждения А-Б при  $t_{B1} = 35^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $25^\circ\text{C}$ )

соответствует  $\xi = 2,75$ , а при  $t_{B1} = 25^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $15^\circ\text{C}$ ) –  $\xi = 2,0$ , т.е. чем более полого проходит луч процесса охлаждения, тем больше  $\xi$  и, следовательно, большее количество теплоты необходимо отвести от влажного воздуха для снижения его температуры на одну и ту же величину.

В случае подачи на вход И-ВО наружного воздуха отдельным воздухопроводом из-за нагрева в воздуховоде температура воздуха на входе И-ВО  $t_{B1}$  будет на  $5^\circ\text{C}$  выше наружной и относительная влажность  $\phi_1 = 50\%$  (процесс нагрева в d-I диаграмме при  $d = \text{const}$ ) при относительной влажности наружного воздуха  $\phi = 70\%$ . При этом процесс охлаждения воздуха от  $t_{B1} = 40^\circ\text{C}$  и  $\phi_1 = 50\%$  (наружный воздух  $35^\circ\text{C}$  и  $\phi = 70\%$ ) до  $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_B = t_{B1} - t_{B2} = 20^\circ\text{C}$ ) проходит с  $\xi = 2$  (на рис. 2 не показано).

Значения удельной (приходящейся на единицу расхода воздуха через ТК  $G_B = 1$  кг/с) теплоты, отведенной от уходящих газов  $\bar{q}_r$  и наддувочного воздуха в генераторе ЭТТ и от воздуха в И-ВО на входе ТК  $\bar{q}_0$ , снижения температуры  $\Delta t_B$  воздуха в И-ВО при разных коэффициентах влаговываждения  $\xi$  в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$  при температуре кипения НРТ в И-ВО  $t_0 = 5^\circ\text{C}$ , газов перед и после генератора ЭТТ  $t_{y1} = 260^\circ\text{C}$  и  $t_{y2} = 150^\circ\text{C}$ , конденсации  $t_k = 35^\circ\text{C}$  представлены на рис. 3. В качестве НРТ применен хладон R142b. Величина  $\xi = 1$  соответствует охлаждению без влаговываждения.

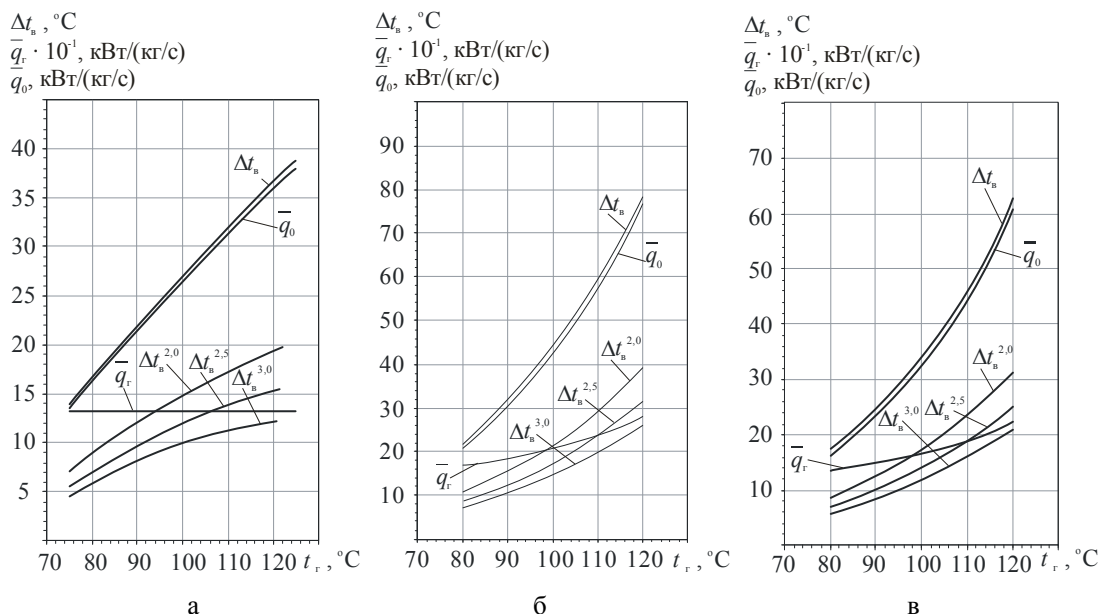
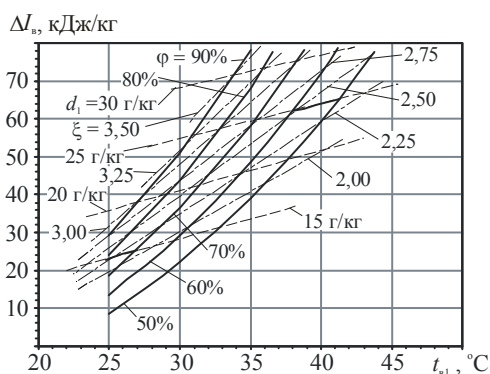


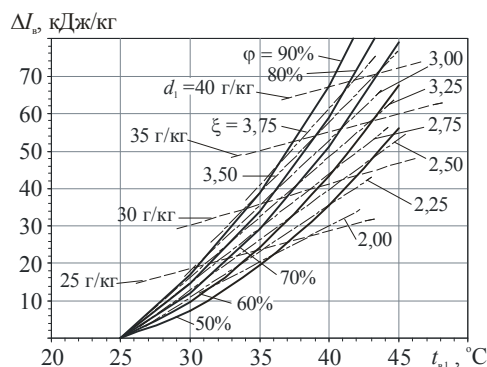
Рис. 3. Удельные теплота, отведенная от уходящих газов и наддувочного воздуха  $\bar{q}_r$  в генераторе ЭТТ и от воздуха в И-ВО на входе ТК  $\bar{q}_0$ , снижения температуры  $\Delta t_B$  воздуха в И-ВО в зависимости от температуры кипения  $t_r$  хладона R142b в генераторе ЭТТ при разных коэффициентах влаговываждения  $\xi$ :  $\Delta t_B \dots \Delta t_B^{3,0} - \xi = 1,0 \dots 3,0$ ; а – схема на рис. 1, а; б и в – схема на рис. 1, б; а и б – использование в ЭТТ всей теплоты уходящих газов; в – использование в ЭТТ 60% теплоты газов

Из рис. 3, а (схема на рис. 1, а) видно, что при температуре кипения НРТ в генераторе  $t_r = 120^\circ\text{C}$  снижение температуры воздуха в И-ВО незначительное и составляет  $\Delta t_b = 12 \dots 20^\circ\text{C}$  при  $\xi = 3 \dots 2$  соответственно. Меньшей величине  $\Delta t_b$  ( $\xi = 3$ ) соответствуют исходные параметры воздуха в зоне ТК (подача воздуха из МО):  $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$  и  $\phi_1 = 70\%$  (наружный воздух  $25^\circ\text{C}$  и  $\phi = 70\%$ ); большей величине  $\Delta t_b = 20^\circ\text{C}$  ( $\xi = 2$ ) – условия подачи наружного воздуха отдельным воздухопроводом:  $t_{b1} = 40^\circ\text{C}$  и  $\phi_1 = 50\%$  (наружный воздух  $35^\circ\text{C}$  и  $\phi = 70\%$ ).

При повышенных температуре и влажности наружного воздуха для его охлаждения на величину  $\Delta t_b = 20^\circ\text{C}$  и более требуется большее количество холода, для чего необходимо использовать дополнительные источники сбросной теплоты, например наддувочный воздух (рис. 1, б). При этом рассматривались варианты использования в испарительной секции генератора ЭТГ всей теплоты уходящих газов и 60 % их теплоты.



а



б

Рис. 4. Зависимости изменения удельной энтальпии  $\Delta I_b$  влажного воздуха в процессе его охлаждения при разных значениях температуры  $t_{b1}$  и относительной влажности  $\phi$  или влагосодержания  $d_1$  воздуха на входе охладителя до состояния насыщения ( $\phi = 100\%$ ) и температуры воздуха  $t_{b2}$  на выходе охладителя: а –  $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ ; б –  $t_{b2} = 25^\circ\text{C}$

Так, исходя из располагаемой удельной холодопроизводительности  $\overline{q_0} = 60 \text{ кВт/(кг/с)}$  (рис. 3, в) получаем из рис. 4, а при  $\Delta I_b = \overline{q_0} = 60 \text{ кДж/кг}$  сочетания тепловлажностных параметров воздуха на входе охладителя:  $t_{b1} = 33^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $23^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 80\%$  ( $\Delta t_b = 33 - 15 = 18^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 3,0$ );  $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 70\%$  ( $\Delta t_b = 20^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 2,75$ );  $t_{b1} = 38^\circ\text{C}$  ( $28^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 60\%$  ( $\Delta t_b = 23^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 2,5$ ). При более высоких температурах наружного воздуха (соответственно и  $t_{b1}$ ) располагаемой величины  $\Delta I_b = \overline{q_0} = 60 \text{ кДж/кг}$  будет недостаточно для его охлаждения в И-ВО до температуры  $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$  и следует использовать графики, соответствующие более высокой  $t_{b2}$ , например  $t_{b2} = 25^\circ\text{C}$  на рис. 4, б, согласно которым получаем другой набор тепловлажностных параметров воздуха на входе охладителя:  $t_{b1} = 40^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $30^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 80\%$

При использовании в испарительной секции генератора ЭТГ 60% теплоты уходящих газов глубина охлаждения воздуха на входе ТК  $\Delta t_b = 20^\circ\text{C}$  (подача в И-ВО на входе ТК воздуха из МО с температурой  $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$  и влажностью  $\phi_1 = 70\%$ ;  $\xi = 3$ ; наружный воздух:  $t_b = 25^\circ\text{C}$  и  $\phi = 70\%$ ) и  $30^\circ\text{C}$  (подача наружного воздуха отдельным воздухопроводом при его параметрах на входе охладителя  $t_{b1} = 40^\circ\text{C}$  и  $\phi_1 = 50\%$ ;  $\xi = 2$ ; наружный воздух:  $t_b = 35^\circ\text{C}$  и  $\phi = 70\%$ ).

Для определения тепловлажностных условий, при которых использование располагаемой теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха в ЭТГ обеспечит соответствующую глубину охлаждения воздуха  $\Delta t_b$  на входе ТК можно воспользоваться графиками зависимости изменения удельной энтальпии  $\Delta I_b$  воздуха в процессе его охлаждения при разных  $t_{b1}$  и  $\phi$  на входе охладителя до состояния насыщения ( $\phi = 100\%$ ) и  $t_{b2}$  на выходе охладителя на рис. 4 для  $t_{b2} = 15$  и  $25^\circ\text{C}$  и подачи в охладитель воздуха из МО.

( $\Delta t_b = 40 - 25 = 15^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 3,6$ );  $t_{b1} = 42^\circ\text{C}$  ( $32^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 70\%$  ( $\Delta t_b = 17^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 3,25$ );  $t_{b1} = 44^\circ\text{C}$  ( $34^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 60\%$  ( $\Delta t_b = 19^\circ\text{C}$ ;  $\xi = 3,0$ ).

Таким образом, глубина охлаждения воздуха на входе ТК составляет  $\Delta t_b = 10 \dots 15^\circ\text{C}$  (при наиболее напряженных в тепловлажностном отношении параметрах воздуха на входе охладителя:  $t_{b1} = 40 \dots 45^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $30 \dots 35^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 80 \dots 70\%$ ),  $\Delta t_b \approx 20^\circ\text{C}$  (при  $t_{b1} = 35 \dots 40^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $25 \dots 30^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 70 \dots 60\%$ ) и  $\Delta t_b = 25 \dots 30^\circ\text{C}$  (при  $t_{b1} = 35^\circ\text{C}$  (наружный воздух  $25^\circ\text{C}$ ) и  $\phi_1 = 60 \dots 70\%$ ).

При подаче в охладитель на входе ТК наружного воздуха отдельным воздухопроводом нагрев воздуха в воздуховоде при неизменном влагосодержании сопровождается уменьшением относительной влажности  $\phi$ . Поэтому процесс охлаждения воздуха в И-ВО происходит при меньшем коэффициенте влаго-

выпадения  $\xi$ , в результате чего снижение его температуры  $\Delta t_v$  примерно на 5 °C больше по сравнению с подачей воздуха в И-ВО из МО.

Принимая согласно данным [1, 2], что снижение температуры  $\Delta t_v$  воздуха на входе ТК на 10 °C обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на 0,6 %, получают экономию топлива на 1...2%, причем максимальная экономия достигается для умеренных температур наружного воздуха 25...30 °C и его относительной влажности  $\phi = 60...70\%$ .

Приведенные результаты получены при сравнительно низком значении теплового коэффициента ЭТТ  $\zeta = 0,25$ , соответствующем температуре кипения НРТ в И-ВО  $t_0 = 5$  °C. Применяя высокоэффективные И-ВО с неполным испарением и рециркуляцией НРТ, можно интенсифицировать теплообмен и за счет этого сократить температурный напор между охлаждаемым воздухом и кипящим НРТ и повысить температуру кипения НРТ в И-ВО на 5 °C. При этом тепловой коэффициент ЭТТ увеличится до  $\zeta = 0,35$ , соответственно в 1,5 раза возрастет эффект от охлаждения воздуха на входе ТК МОД.

### Выводы

Применение эжекторных термо-трансформаторов, использующих теплоту уходящих газов и над-

дувочного воздуха для охлаждения воздуха на входе ТК судовых МОД обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на 1...2 %, причем максимальная экономия достигается при умеренных температурах наружного воздуха 25...30 °C и его относительной влажности  $\phi = 60...70\%$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований МОН Украины в рамках гранта Президента Украины (Розпорядження Президента України про призначення грантів Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених від 16.12.2008 р. № 336/2008-рп).

### Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
3. Радченко Р.Н. Использование теплоты уходящих газов для предварительного охлаждения воздуха судовых ДВС / Р.Н. Радченко // *Двигатели внутреннего сгорания*. – Х.: НТУ "ХПИ", 2008. – № 1. – С. 110-114.

Поступила в редакцию 19.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Живица, Одесская национальная морская академия, Одесса.

### ВИКОРИСТАННЯ СКИДНОГО ТЕПЛА МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ

*Р.М. Радченко, М.Я. Хлопенко*

Проаналізовано використання теплоти відхідних газів і наддувочного повітря судових малообертових дизелів для охолодження повітря на вході турбокомпресорів тепловикористовуючими холодильними машинами. Розраховані величини зниження температури повітря, що досягаються виходячи зі скидної теплоти за різних тепловологісних умов на вході. Визначені межі ефективного застосування комплексної утилізації скидної теплоти малообертових дизелів для охолодження повітря на вході турбокомпресорів.

**Ключові слова:** малообертовий дизель, утилізація теплоти, охолодження повітря, термодвиг, низькокипляче робоче тіло.

### THE UTILIZATION OF WASTE HEAT IN LOW SPEED DIESEL ENGINES FOR COOLING THE AIR AT THE INLET OF TURBOCOMPRESSORS

*R.N. Radchenko, N.Y. Hlopenko*

The utilization of the heat of exhaust gases and scavenge air in marine low speed diesel engines for cooling the air at the inlet of turbocompressors by waste heat recovery refrigeration machines has been analyzed. The values of air temperature drop corresponding to the waste heat consumed at various heat-humidity conditions at the inlet were estimated. The field of effective application of complex waste heat recovery in low speed diesel engines for cooling the air at the inlet of turbocompressors was determined.

**Key words:** low speed diesel engine, utilization of heat, cooling of air, thermotransformer, low boiling working fluid.

**Радченко Роман Николаевич** – аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Хлопенко Николай Яковлевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, А. СТАХЕЛЬ<sup>2</sup>, Н.И. РАДЧЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина<sup>2</sup>Западно-Померанский технологический университет, Польша

## ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА В КОМПРЕССОРАХ ГТД С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОСУШЕНИЕМ ТЕПЛОИСПОЛЗУЮЩЕЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Проанализирована целесообразность применения эжекторных теплоиспользующих холодильных машин, утилизирующих теплоту уходящих газов газотурбинных двигателей для осушения наружного воздуха на входе компрессора. Определены значения снижения температуры воздуха и количества отводимой влаги. Предложена технология комбинированного применения предварительного поверхностного охлаждения воздуха с осушением теплоиспользующей холодильной машиной и испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, осушение воздуха, поверхностное охлаждение, испарительное охлаждение, теплоиспользующая холодильная машина.

### Анализ проблемы и постановка цели исследования

Эффективность работы ГТД существенно зависит от температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$ : с повышением температуры  $t_{\text{нв}}$  на 10 °С мощность ГТД снижается на 5...9% [1, 2]. Наиболее широкое применение в ГТД получило испарительное охлаждение с впрыском воды в воздушный поток на входе компрессора ГТД [1, 2]. В зависимости от количества впрыскиваемой воды возможны два варианта испарительного охлаждения воздуха: предварительное охлаждение с испарением всей впрыскиваемой воды до всасывания компрессором и внутреннее испарительное охлаждение, когда избыточная (сверх насыщения) влага испаряется в процессе повышения давления и соответственно температуры воздуха в компрессоре. При предварительном испарительном охлаждении перед компрессором снижение температуры воздуха в процессе его увлажнения до состояния насыщения ограничивается температурой по мокрому термометру и в большинстве климатических условий не превышает 10...15 °С. При внутреннем испарительном охлаждении воздуха процесс повышения давления и температуры воздуха при его сжатии в компрессоре приближается к изотермическому, следствием чего является уменьшение удельной работы сжатия и увеличение полезной работы ГТД.

Охлаждение воздуха в поверхностном теплообменнике в отличие от увлажнения при испарительном охлаждении обеспечивает не только большее снижение температуры наружного воздуха, но и

уменьшение его влагосодержания на входе компрессора, а значит и затрат мощности на сжатие влажного воздуха в компрессоре, которые сокращаются прямо пропорционально доле влаги, отведенной от наружного воздуха в процессе его охлаждения. При повышенной влажности наружного воздуха отведенная в процессе предварительного охлаждения влага может составлять заметную долю и использоваться для внутреннего испарительного охлаждения воздуха при сжатии в компрессоре. Поскольку тепловой потенциал отработавших газов ГТД простой схемы достаточно высокий (около 500 °С), то для предварительного охлаждения воздуха целесообразно применять теплоиспользующую холодильную машину (ТХМ).

**Цель работы** – оценка целесообразности предварительного осушения воздуха теплоиспользующей холодильной машиной с последующим внутренним испарительным его охлаждением при сжатии в компрессоре.

### Изложение результатов исследования

Проанализируем сначала потенциально возможное, исходя из располагаемой теплоты отработавших газов ГТД, снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в испарителе-воздухоохладителе (И-ВО) ТХМ и количество влаги, отводимой в процессе охлаждения с осушением. В качестве ТХМ рассмотрены конструктивно наиболее простые и надежные в эксплуатации эжекторные ТХМ (ЭТХМ).

Схема ЭТХМ для предварительного охлаждения воздуха перед компрессором ГТД приведена на

рис. 1. Применение в качестве рабочего тела в ЭТХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) обеспечивает глубокую утилизацию теплоты уходящих газов и охлаждение наружного воздуха до низких температур без необходимости поддержания вакуума в И-ВО.

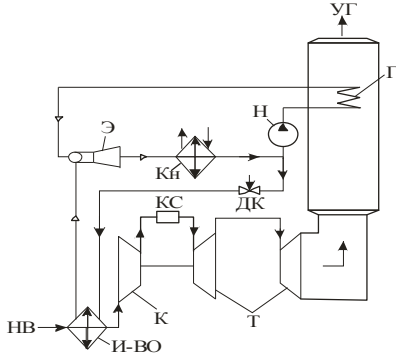


Рис. 1. Схема ЭТХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе компрессора ГТД:

К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; Г – генератор пара НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

ЭТХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для сжатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из И-ВО холодильного контура, до давления в конденсаторе. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара, всасываемого из И-ВО, происходит в камере смешения и диффузоре).

Эффективность ЭТХМ характеризуется тепловым коэффициентом  $\zeta = Q_0 / Q_r$ , который представляет собой отношение холодопроизводительности  $Q_0$  (количества теплоты, отведенной от наружного воздуха в испарителе И-ВО) к количеству теплоты  $Q_r$ , подведенной в генераторе к НРТ от уходящих газов. Тепловой коэффициент  $\zeta$  возрастает с повышением температур кипения в генераторе  $t_r$  и испарителе  $t_0$  и снижением температуры конденсации  $t_k$ . Для экологически безопасных хладонов R142B и R600 (н-бутан), обеспечивающих повышенные  $\zeta$ , максимальная температура  $t_r$ , допускаемая исходя из их термической стойкости, около 120 °С.

Охлаждение влажного воздуха в поверхностных И-ВО сопровождается выпадением влаги в процессе конденсации находящихся в воздухе водяных паров и характеризуется коэффициентом влаговываждения  $\xi$ , который представляет собой отношение полного количества теплоты, отведенной от влажного воздуха, к явной теплоте, определяемой разностью температур по сухому термометру:  $\xi =$

$(I_{B1} - I_{B2}) / [c_{вл} \cdot (t_{B1} - t_{B2})]$ , где  $c_{вл}$  – теплоемкость влажного воздуха  $c_{вл} = 1,01 + 1,89d$ ;  $d$  – влагосодержание, кг/кг;  $t_{B1}$  и  $t_{B2}$  – температуры воздуха на входе и выходе из охладителя по сухому термометру;  $I_{B1}$  и  $I_{B2}$  – удельные энтальпии воздуха на входе и выходе из охладителя,  $I_B = c_{вл} \cdot t_B + 1,89d$ , кДж/кг.

Исходя из располагаемой холодопроизводительности ЭТХМ  $Q_0 = \zeta Q_r$ , где  $Q_r$  – количество теплоты, отведенной в генераторе ЭТХМ от уходящих газов;  $\zeta$  – тепловой коэффициент ЭТХМ, рассчитывают снижение температуры  $\Delta t_B$  воздуха в И-ВО с учетом коэффициента влаговываждения  $\xi$ :  $\Delta t_B = Q_0 / (\xi c_{вл} G_B)$ , где  $G_B$  – расход воздуха. Значение коэффициента влаговываждения  $\xi$  находят из построения процесса охлаждения воздуха в диаграмме d-I (влагосодержание-удельная энтальпия) влажного воздуха или аналитическим путем по уравнениям для расчета энтальпии воздуха на входе И-ВО  $I_{B1}$  и энтальпии  $I_n$  насыщенного воздуха (относительная влажность  $\phi = 100\%$ ) при температуре  $t_n$  наружной поверхности И-ВО (значение  $t_n$  принимают в зависимости от температуры кипения НРТ  $t_0$ ), а также соответствующих влагосодержаний  $d_1$  и  $d_n$ . При этом  $Q_0 = G_B (I_{B1} - I_{B2})$ .

Удельные (отнесенные к расходу  $G_B$  воздуха через ГТД) холодопроизводительность  $\bar{q}_0$  и теплота, отведенная в генераторе ЭТХМ от уходящих газов (тепловая нагрузка на генератор)  $\bar{q}_r$ , снижение температуры  $\Delta t_B$  воздуха в И-ВО ЭТХМ при разных коэффициентах влаговываждения  $\xi$  и удельное (отнесенное к расходу воздуха  $G_B$ ) количество влаги  $\bar{g}_{вл}$ , отведенной в процессе охлаждения, в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$  при температурах кипения в И-ВО  $t_0 = 5$  °С; конденсации  $t_k = 35$  °С, уходящих газов перед ЭТХМ  $t_{r1} = 500$  °С и после ЭТХМ  $t_{r2} = 100$  °С приведены на рис. 2. В качестве НРТ применен озонобезопасный хладон R142B.

Как видно, при температуре кипения НРТ в генераторе  $t_r = 120$  °С удельная холодопроизводительность  $\bar{q}_0$  и, соответственно, снижение температуры воздуха в И-ВО, достигаемые исходя из располагаемой теплоты уходящих газов с температурой 500 °С, максимальные. При этом глубина охлаждения воздуха в И-ВО на входе ГТД весьма значительная:  $\Delta t_B = 40 \dots 60$  °С при значениях коэффициента влаговываждения  $\xi = 1,0 \dots 3,0$ , а удельное, приходящееся на единицу расхода воздуха через ГТД ( $G_B = 1$  кг/с), количество влаги, отведенной в процессе охлаждения,  $\bar{g}_{вл} = 20 \dots 40$  г/с.

Для определения достижимых значений снижения температуры  $\Delta t_B$  воздуха и количества отведенной от него влаги  $\Delta d$  (исходя из располагаемой

удельной холодопроизводительности  $\bar{q}_0 = 120$  кДж/кг на рис. 2) при конкретных тепловлажностных условиях ( $t_{в1}$  и  $\phi$ ) можно воспользоваться графиками зависимости изменения удельной энтальпии  $\Delta I_{в} = \bar{q}_0$  и влагосодержания  $\Delta d$  влажного воздуха в процессе его охлаждения до состояния насыщения ( $\phi = 100\%$ ) и температуры на выходе охладителя  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  при разных значениях относительной влажности  $\phi$  на входе охладителя, приведенными на рис. 3.

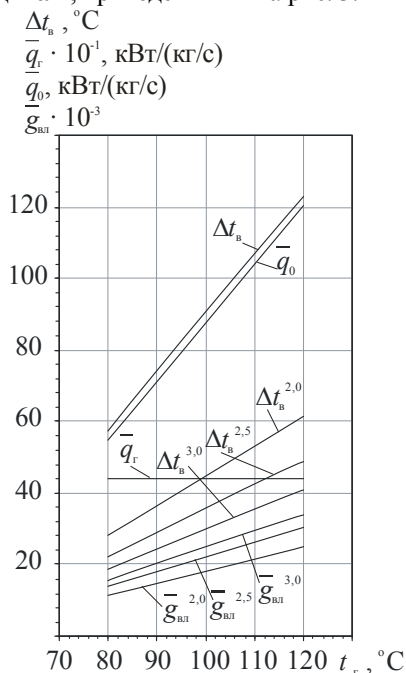


Рис. 2. Удельные холодопроизводительность  $\bar{q}_0$  и тепловая нагрузка на генератор  $\bar{q}_g$ , снижение температуры  $\Delta t_b$  воздуха в И-ВО и удельное количество влаги  $\bar{g}_{вл}$ , отведенной от воздуха, в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$  при разных коэффициентах влаговываждения  $\xi$ :  $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3,0}$  и  $\bar{g}_{вл} \dots \bar{g}_{вл}^{3,0}$  при  $\xi = 1,0 \dots 3,0$

Как видно, при охлаждении наружного воздуха с относительной влажностью  $\phi = 50; 60$  и  $70\%$  на величину, например  $\Delta t_b = 30^\circ\text{C}$  (температура наружного воздуха на входе И-ВО  $t_{в1} = t_{в2} + \Delta t_b = 15 + 30 = 45^\circ\text{C}$ ), уменьшение влагосодержания  $\Delta d \approx 20; 25$  и  $35$  г/кг соответственно ( $\xi \approx 2,5; 3,0; 3,5$ ), т.е. количество отведенной влаги составляет примерно 2; 2,5 и 3,5 % от расхода воздуха  $G_b$  через компрессор ГТД. Следовательно, на 2; 2,5 и 3,5% сокращаются затраты мощности на сжатие влажного воздуха в компрессоре. Обычно такую долю воды впрыскивают при испарительном охлаждении воздуха в ГТД.

При относительной влажности наружного воздуха  $\phi = 80\%$  и более располагаемой удельной холодопроизводительности  $\Delta I_{в} = \bar{q}_0 = 120$  кДж/кг

(рис. 2) недостаточно для охлаждения воздуха на величину  $\Delta t_b = 30^\circ\text{C}$  (согласно рис. 3), а при  $\phi \leq 40\%$  количество отведенной влаги менее 1 % от расхода воздуха  $G_b$  через компрессор ГТД ( $\Delta d \leq 10$  г/кг).

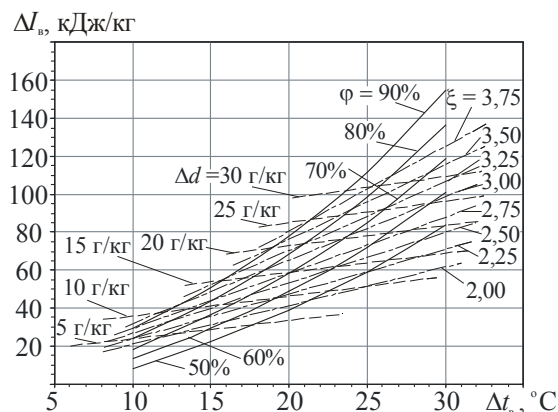


Рис. 3. Изменение удельной энтальпии  $I_b$  и влагосодержания  $\Delta d$  влажного воздуха в зависимости от снижения температуры  $\Delta t_b$  в процессе его охлаждения до состояния насыщения ( $\phi = 100\%$ ) и температуры на выходе охладителя  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  при разных значениях относительной влажности  $\phi$  на входе охладителя

Таким образом, при повышенных влажности и температуре наружного воздуха его охлаждение с осушением в поверхностном И-ВО ЭТХМ обеспечивает предварительную тепловлажностную обработку воздуха, создавая условия для эффективного последующего применения испарительного внутреннего охлаждения воздуха при сжатии в компрессоре путем впрыскивания воды на всасывании.

Результаты сравнения приращения мощности  $\Delta N_e$  ГТД за счет предварительного испарительного охлаждения воздуха – до состояния насыщения (без избытка впрыскиваемой воды  $OS = 0$ ) и внутреннего (при сжатии в компрессоре) испарительного охлаждения воздуха при массовой доле впрыскиваемой воды 2 % ( $OS = 2\%$ ) по данным [1, 2], предварительного поверхностного охлаждения воздуха в ЭТХМ на  $25^\circ\text{C}$  (от  $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$ ), а также совместного поверхностного охлаждения воздуха в ЭТХМ и испарительного его охлаждения (при сжатии в компрессоре) при впрыскивании воды на входе компрессора в количестве 1% ( $OS = 1\%$ ) в зависимости от удельной, приходящейся на единичный расход топлива, мощности  $N_{уд}$  двигателей, взятой при параметрах ISO, приведены на рис. 4. При этом холодопроизводительность  $Q_0$  (количество теплоты, отведенной от наружного воздуха в ЭТХМ), снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в ЭТХМ и теплопотребление ЭТХМ  $Q_r$  (теплота, отводимая от уходящих газов ГТД), рассчитывались авторами по собственной методике, а оценка их влияния на показатели ГТД производилась с использованием характеристик ГТД, приведенным в [1, 2].

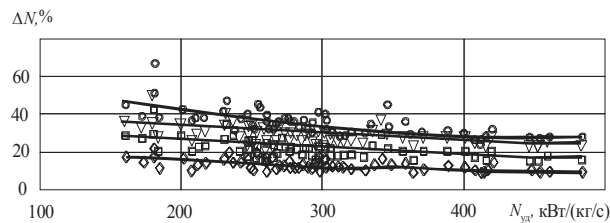


Рис. 4. Приращение мощности  $\Delta N_e$  ГТД за счет испарительного предварительного и внутреннего охлаждения воздуха, предварительного охлаждения воздуха в ЭТХМ и их комбинации в зависимости от удельной мощности ГТД  $N_{уд}$ :  $\square$  – ЭТХМ на 25 °C;  $\diamond$  – OS = 0%;  $\circ$  – OS = 2% [1, 2];  $\blacktriangledown$  – ЭТХМ и OS = 1% [1, 2]

Из рис. 4 видно, что применение ЭТХМ для предварительного охлаждения воздуха от  $t_{нв} = 40$  °C до 15 °C обеспечивает повышение мощности ГТД на 20...30 %, а совместно с испарительным охлаждением воздуха в процессе его сжатия в компрессоре при массовой доле воды, впрыскиваемой в воздух на входе компрессора 1 % – на 30...40 %.

### Выводы

1. Охлаждение воздуха на входе ГТД на 25...30 °C в ЭТХМ с использованием теплоты уходящих газов температурой 500 °C обеспечивает повышение

мощности ГТД на 20...30 %. За счет отведения влаги в процессе осушения воздуха затраты мощности на его сжатие в компрессоре сокращаются на 2...3,5 %.

2. Совместное охлаждение воздуха на входе ГТД в ЭТХМ и его испарительное охлаждение при сжатии в компрессоре обеспечивает повышение мощности ГТД на 30...40 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований МОН Украины в рамках гранта Президента Украины.

### Литература

1. Bhargava R. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging / R. Bhargava, C.B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – P. GT-2002-30560. – 15 p.
2. Parametric analysis of combined cycles equipped with inlet fogging / R. Bhargava, M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2003-38187. – 12 p.

Поступила в редакцию 19.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Е. Лагутин, Одесская государственная академия холода, Одесса.

### ВИПАРОВУВАЛЬНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ В КОМПРЕСОРІ ГТД З ПОПЕРЕДНІМ ОСУШЕННЯМ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ

А.М. Радченко, А. Стахель, М.І. Радченко

Проаналізована доцільність застосування ежекторних тепловикористовуючих холодильних машин, що утилізують теплоту відхідних газів газотурбінних двигунів для осушення зовнішнього повітря на вході компресора. Визначені значення зниження температури повітря та кількості відведеної вологи. Запропонована технологія комбінованого застосування попереднього поверхневого охолодження повітря з осушенням тепловикористовуючою холодильною машиною та випаровувального охолодження повітря у процесі його стискування в компресорі.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, осушення повітря, поверхневе охолодження, випаровувальне охолодження, тепловикористовуюча холодильна машина.

### EVAPORATIVE COOLING OF AIR IN COMPRESSORS OF GTE WITH PREVIOUS DRYING BY WASTE HEAT RECOVERY REFRIGERATION MACHINE

A.N. Radchenko, A. Stachel, N.I. Radchenko

The expediency of application of ejector waste heat recovery refrigeration machines, utilizing a heat of exhaust gases of gas turbine engines for drying of ambient air at the compressor inlet, have been analyzed. The values of air temperature drop and quantity of water extracted were estimated. The technology of combined surface precooling with drying of air by waste heat recovery refrigeration machine and evaporative cooling of air during its compressing in the compressor.

**Key words:** gas turbine engine, air drying, surface cooling, evaporative cooling, waste heat recovery refrigeration machine.

**Радченко Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, с.н.с., доцент кафедры, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Стахель Александр** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры, Западно-Померанский университет технологии, Польша, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Радченко Николай Иванович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН<sup>1</sup>, Т.П. ГРЫЗЛОВА<sup>2</sup>, О.Н. БЫЛИНКИНА<sup>1</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие РФ  
«Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия<sup>2</sup>Рыбинская государственная авиационная технологическая  
академия им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ МНОГОВАЛЬНОГО ГТД НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЕГО ВАЛОВ

На основе спектрального анализа реальных вибропроцессов многовального ГТД выбран диагностический признак потери соосности его валов. Рассмотрены алгоритмы контроля состояния роторных систем применительно к выявлению указанного признака. Традиционный алгоритм строится на использовании узкополосной цифровой фильтрации заданных кратно-роторных составляющих вибропроцесса. Предпринята попытка получения алгоритмов контроля, в основе которых лежит модель сложного источника, формализованная методами математической теории проектирования вычислительных систем. Показано, что полученные таким способом алгоритмы могут быть эффективно использованы для контроля состояния роторов в реальном времени. Обсуждены достоинства и перспективы применения алгоритмов анализа системы роторов по характеристикам и кодам полуоволн.

**Ключевые слова:** турбовинтовентиляторный двигатель (ТВВД), диагностический признак, сложный источник, винтовентилятор, распознавание последовательности, распознавание состояний, вибропроцесс, спектр, гармоника, полуоволны, контроль, реальное время.

### Введение

Контроль и диагностика состояния роторных систем по вибросигналу получили широкое распространение в двигателестроении [1, 2]. Поэтому разработка и совершенствование алгоритмов такого контроля в реальном времени, адаптированных к современным методам и средствам обработки сигналов, не теряет своей актуальности. Настоящая публикация посвящена синтезу алгоритма виброконтроля состояния роторной системы по известному диагностическому признаку на основе применения к вибросигналам, составляющим обучающую последовательность, методов временного анализа, предложенных для решения формализованной задачи распознавания последовательности состояний сложного источника [3, 4].

**Формулирование проблемы и методы ее решения.** При анализе материалов вибрографирования демонстрационного ТВВД большой размерности и сверхбольшой степени двухконтурности с закапотированным биротативным винтовентилятором было выявлено кратковременное нарушение соосности валов ротора высокого (РВД) и низкого (РНД) давления двигателя [5, 6]. Это нарушение было обнаружено по вибросигналам, замеренным на редукторе, и наблюдалось на проходных режимах работы

двигателя, соответствующих критическим оборотам вала ротора высокого давления ( $N_{\text{РВД}} = 94\%$ ). Оно проявлялось в большей интенсивности составляющей вибрации РВД2 (с частотой второй кратности к частоте вращения ротора высокого давления), нежели интенсивность роторной составляющей РВД.

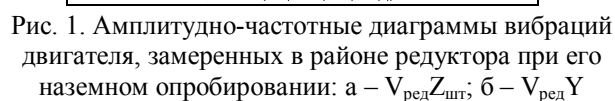
Указанное явление иллюстрируется рис. 1, на котором показана диаграмма Кемпбелла, полученная для вибропроцессов, измеренных на редукторе. Вибрации двигателя при расчете диаграммы оценивались в полосе частот 10...10000 Гц.

При идентификации источников колебаний использовался спектральный анализ вибропроцессов с разрешением 1Гц и частотная модель трехвального двигателя, включающая в себя также два ротора разноразворачивающихся колес винтовентилятора в капоте и более мелкие ротора агрегатов, входящих в кинематическую схему двигателя.

Цель настоящей работы – разработка алгоритмов контроля состояния роторной системы с использованием вышеуказанного диагностического признака потери соосности валов, когда выполняется соотношение

$$A_{\text{РВД2}}/A_{\text{РВД}} \geq 1, \quad (1)$$

где  $A$  – интенсивность вибропроцесса.



Главными преимуществами оцениваемого подхода служат минимальные ограничения к анализируемому сигналу в части его стационарности, случайности и длительности. В основе подхода лежит принцип повторяемости элементов сигнала и общности законов формирования объектов одного класса. При этом элементарные сигналы могут быть сильно вариативными, а законы их формирования сложными и неизвестными [4].

Именно с сигналами подобного вида нередко приходится сталкиваться в практике вибрационной диагностики и виброконтроля авиационных ГТД, когда известные модели источников – комбинаторные, вероятностные, стационарные и составные[3], [4] не отражают реальной сложности исследуемых объектов. Это приводит к ограничениям применения классических методов спектрального, корреляционного или авторегрессионного анализа.

### 1.1. Разработка алгоритма контроля при традиционном подходе

Из рассмотрения модифицированной диаграммы Кемпбелла, иллюстрирующей интенсивность

Полагая, что отклонение в соосности валов может быть вызвано не только критическими оборотами одного из роторов, оставим без внимания ограничение, связанное с режимом их проявления при критических оборотах РВД. В этом случае алгоритм контроля должен включать в себя следующие основные процедуры.

2. Следящую фильтрацию вибросигнала в полосе частот  $f_{\text{рвд}} \pm \delta f_1$  и  $f_{\text{рвд}2} \pm \delta f_2$  с определением интенсивности  $A_{\text{рвд}2}$  и  $A_{\text{рвд}}$  на одинаковых фиксированных временных интервалах.

4. Сравнение значения полученного в п.3. отношения с 1,0.

$$A_{\text{pвд}2}/A_{\text{pвд}} \geq 1^*.$$

Значения  $\delta f_1$  и  $\delta f_2$  выбираются из условий близости значимых составляющих реального спектра по частоте к частотам  $f_{\text{рвд}}$  и  $f_{\text{рвд}2}$  и обеспечения заданной погрешности воспроизведения сигнала при требуемой скорости перестройки фильтра, определяемой переходными процессами в ГТД.

\* Граничное соотношение  $A_{pvd2}/A_{pvd}$  может быть назначено и меньшим 1,0 в зависимости от опасности потери соосности валов для конкретной конструкции многороторного ГТД.

Вышеуказанный алгоритм контроля может быть реализован в цифровом и аналоговом исполнении. В любом случае потребуются достаточно серьезные временные и финансовые затраты на разработку и изготовление фильтров с характеристиками, которые в состоянии обеспечить эффективную процедуру контроля [1, 2], что невозможно без наличия адекватной модели вибросигнала в эксплуатационных условиях работы контролируемого ГТД.

## 1.2. Краткая характеристика метода анализа состояния сложного источника

Предлагаемый метод анализа использует информацию, заключенную в характеристиках полуволн и их последовательностей, привязанную к последовательности моментов времени пересечения сигналом нулевого уровня. Главное достоинство метода состоит в том, что он базируется на простых и быстрых алгоритмах вычисления нестационарных

функционалов от временных характеристик сигналов, которые могут быть информативнее, чем распространенные функционалы от амплитудных характеристик. Основные положения метода заключаются в следующем.

В отличие от анализа Фурье для временного анализа не выдвигается предположение о стационарности сигнала на интервале анализа. Короткие временные окна  $\beta$ , используемые для вычисления функционала  $\Phi_3(t, \beta)$  – среднего значения квадрата приращения расстояния между кодами полувольт в зависимости от дискретного времени или номера отсчета  $t$ , можно подобрать при обучении. Также при обучении выбирается тип используемого для анализа функционала:  $\Phi_3(t, \beta)$ ,  $\Phi_2(t)$ ,  $\Phi_1(t)$  и (или) непосредственно длины полувольт  $TNW^+(t)$  либо их параметры – среднее  $MNW^+(t)$ , дисперсия  $DHW^+(t)$ , код  $CHW^+(t)$ . Функционал  $\Phi_1(t)$  представляет собой расстояние по Хеммингу между двоичными кодами полувольт. Функционал  $\Phi_2(t)$  представляет собой квадрат приращения функционала  $\Phi_1(t)$ . Алгоритмы вычисления приведены в [3, 4].

Процедуры анализа и синтеза метода анализа включают в себя три основных этапа. На первом этапе выявляются пересечения нулевого уровня  $t_{0i}, t_{1i}$  в положительном и в отрицательном направлениях, соответственно. Индекс меняется в реальном времени при обнаружении очередного перехода. На втором этапе выделяется полуволна как фрагмент сигнала  $s_{t_{0i}}^{t_{1i}} = HW_i^+$ .

Третий этап *синтеза* состоит в выборе правил принятия решения или обучения. Обработка на этом этапе зависит от целей и может включать в себя сегментацию, обучение распознаванию сегментов, обнаружение нарушений однородности процесса. Наиболее значимым является формирование правил принятия решения о существенном изменении сигналов или смене состояния источника, а также обучение распознаванию состояния источника.

Третий этап *анализа* сигналов (использование алгоритмов контроля) заключается в вычислениях выбранных на этапе синтеза функционалов, проверке необходимых условий и принятии решения.

### 1.3. Методика получения и апробации алгоритма контроля состояния ГТД с использованием модели сложного источника

Имея достоверный диагностический признак потери соосности валов трехвального ГТД, попробуем получить алгоритм контроля потери этой соосности нетрадиционным методом, основанным на использовании модели сложного источника. Для этого воспользуемся программной реализацией ме-

тода автоматизированного анализа последовательности состояния такого источника согласно [3, 4].

В качестве указанного источника будем оценивать располагаемые записи вибросигналов, полученных на реальном двигателе.

Вибрации двигателя, для которого разрабатывался алгоритм контроля несоосности валов, оценивались в штатных местах по оси  $Z$  на редукторе, передней опоре и в плоскости опоры турбины  $V_{ред} Z_{шт}$ ,  $V_{по} Z_{шт}$ ,  $V_{оп.т} Z_{шт}$  соответственно, а также по экспериментальным замерам по оси  $Y$  на редукторе ( $V_{ред} Y$ ) и передней опоре ( $V_{по} Y$ ).

В качестве обучающей последовательности при отработке алгоритма виброконтроля с использованием модели сложного источника принималась первая из двух располагаемых временных последовательностей вибросигналов, замеренных на редукторе ( $V_{ред} Y$  и  $V_{ред} Z_{шт}$ ), в которых в ограниченном временном интервале 34 секунды проявляется диагностический признак в виде условия  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ .

При апробации метода использовались все шесть располагаемых временных последовательностей (реализаций) вибропроцессов длительностью 12 минут, при том, что только две из них ( $V_{ред} Y$  и  $V_{ред} Z_{шт}$ ) содержали диагностический признак.

Подчеркнем, что все четыре последовательности реального вибросигнала без наличия диагностического признака получены на том же двигателе, что и реализации  $V_{ред} Z_{шт}$  и  $V_{ред} Y$ , но с помощью вибродатчиков, установленных в других местах ( $V_{по} Z_{шт}$ ,  $V_{оп.т} Z_{шт}$ ,  $V_{по} Z_{шт}$ ,  $V_{оп.т} Z_{шт}$ ).

Такая манипуляция последовательностями вибросигналов при моделировании процедуры эксплуатационного контроля представляется вполне обоснованной, ибо в качестве источника составляющих вибропроцесса выступает один и тот же многороторный ГТД. Это гарантирует близость частотной структуры спектров при существенной разнице интенсивности одних и тех же составляющих.

Последовательности цифровых отсчетов всех обследуемых реализаций вибропроцессов группировались в файлы (векторные столбцы). Частота дискретизации составляла  $f_d = 13284$  Гц. По каждой компоненте векторного сигнала выполнялось вычисление функционалов, указанных в разделе 1.2. В процессе вычислений осуществлялись следующие основные процедуры.

1. Контролировались события пересечения вибросигналом нулевого уровня в положительном и отрицательном направлении.

2. В массив, индексированный номером полувольты, записывался момент времени, когда возникло событие ее возникновения.

3. По мере поступления отсчетов вибросигнала

вычислялись длины полувольт и сравнивались расстояния по Хэммингу между двоичными кодами полувольт (функционал  $\Phi 1(t)$ ).

4. Вычислялось среднее приращение расстояния по Хэммингу между кодом текущей полувольты и средним кодом нескольких предыдущих полувольт (функционал  $\Phi 3(\beta, t)$ ).

При моделировании и отборе рабочего функционала исследовались последовательность длин полувольт ( $THW(t)$ ), среднее ( $MHW(t)$ ) и дисперсия ( $DHW(t)$ ) по полувольте  $NW^+$ , функционалы  $\Phi 1(t)$  –  $\Phi 3(t)$ , коды полувольт. Главное достоинство указанных алгоритмов – отсутствие процедуры умножения и сокращение анализируемой длины последовательности в несколько раз.

#### 1.4. Результаты анализа

На рис. 2 показано изменение по времени интенсивности вибропроцессов  $V_{ред}$ ,  $Z_{шт}$ ,  $V_{ред}$   $Y$  при наземном опробовании двигателя, а также изменение амплитудных составляющих РВД2 и РВД указанных вибропроцессов для фрагмента записи, где реализуется условие  $A_{РВД2}/A_{РВД} = 2$ .

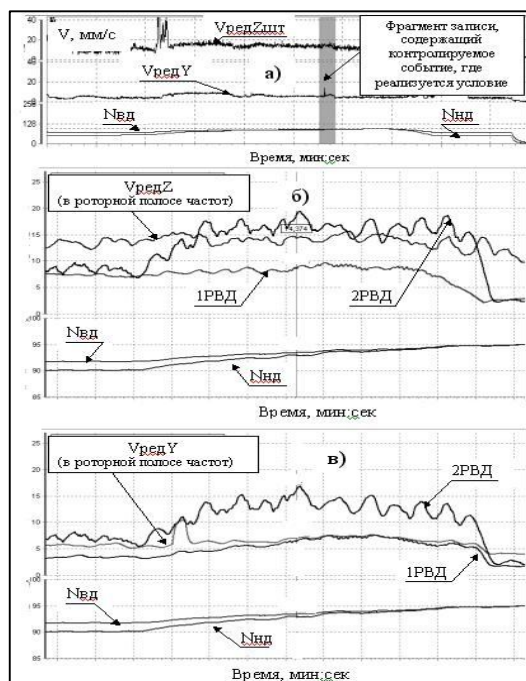


Рис. 2. Изменение СКЗ вибропроцессов  $V_{ред}Z$ ,  $V_{ред}Y$  при наземном опробовании двигателя (а): амплитудные составляющие 2РВД и РВД для  $V_{ред}Z_{шт}$  (б) и  $V_{ред}Y$  (в) на временном интервале, соответствующем выделенному фрагменту записи, где реализуется условие  $A_{РВД2}/A_{РВД} = 2$

Временная последовательность вибропроцесса по каналу  $V_{ред} Y$ , соответствующая вышеуказанному фрагменту записи, использовалась в настоящем

исследовании, как обучающая.

Результаты расчета длины полувольт, а также функционалов  $\Phi 1(t)$  и  $\Phi 3(t)$  как функций номера отсчета  $t$  в обучающей выборке показаны на рис. 3. Из рассмотрения рисунка видна чувствительность всех использованных характеристик к диагностическому признаку.

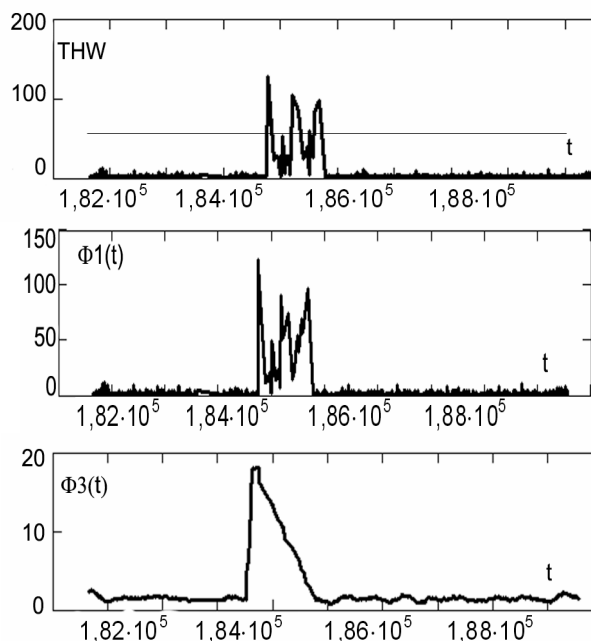


Рис. 3. Длины полувольт ( $THW$ ), функционал  $\Phi 1(t)$  и функционал  $\Phi 3(t, \beta = 64)$ , полученные по обучающей выборке  $V_{ред} Y$

Визуальная оценка графиков функционалов позволила выбрать соответствующие пороги (отношение максимума функции к ее среднему уровню в окрестности максимума) для каждого из функционалов  $Th^{PL}$ ,  $Th^{F1}$ ,  $Th^{F3}$ . Решение о наличии признака «критической ситуации» принимается по условию превышения порога соответствующим функционалом (рис. 4).

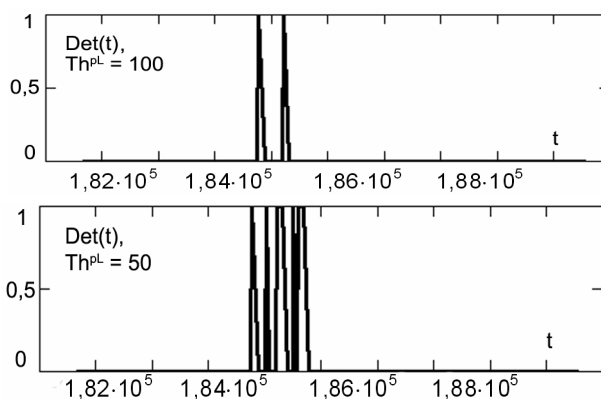


Рис. 4. Оценка ситуации по обучающей выборке (1 – «соосность нарушена», 0 – система роторов соосна) при различных порогах  $Th^{PL}$  (длины полувольт)

Ниже на рис. 5 и 6 представлены результаты тестирования предлагаемого алгоритма на реализации, включающей обучающую последовательность, и для контрольной последовательности по полной реализации.

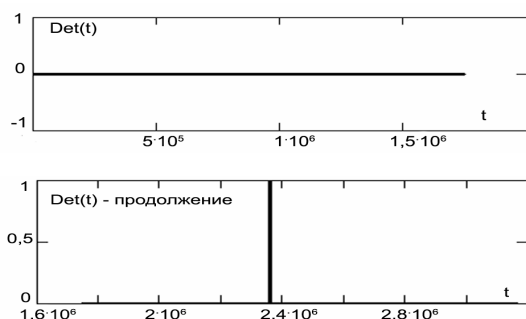


Рис. 5. Решение на контрольной реализации

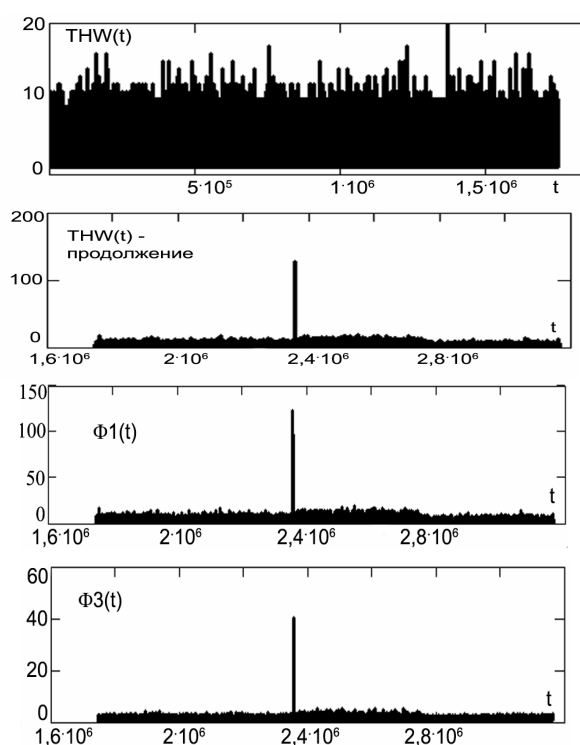


Рис. 6. Результаты тестирования алгоритма для контрольной последовательности

Рисунки иллюстрируют эффективность предложенного подхода для контроля в реальном времени за событием двойного превышения интенсивности вибраций на частоте второй роторной гармоники по сравнению с первой для ротора высокого давления двигателя по вибросигналу  $V_{ред} У$ .

Несмотря на то, что анализ осуществлялся для реального достаточно зашумленного другими составляющими спектра вибросигнала (см.рис.1), все обследованные функционалы на основе характеристик полувольт дают превышение среднего уровня

более чем в 20 раз. Превышения порога функционалами не наблюдалось ни при каких иных значениях времени для реализаций  $V_{ред} У$ , кроме момента, соответствующего событию  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ .

Ложных признаков анализируемого события при тестировании всех располагаемых реализаций (с длительностью 12 минут каждая), кроме реализации  $V_{ред} Z_{шт}$  также не обнаружено.

При тестировании полной 12-ти минутной реализации  $V_{ред} Z_{шт}$  решение о появлении анализируемого события с помощью выше указанных алгоритмов выдавалось неоднозначным. Помимо фиксации времени проявления события  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ , отмечено и несколько ложных решений в окрестности контролируемого события. Таким образом, рассматриваемая форма алгоритмов оказалась инвариантной к направлению измерения вибраций в районе редуктора. Поэтому контроль несоосности валов обследуемого ГТД целесообразно определять по вибросигналу  $V_{ред} У$ .

## Резюме

При диагностировании несоосности валов по вибросигналу  $V_{ред} У$  признак для принятия решения легко распознается визуально по выбросам всех информационных процессов  $THW^+(t)$ ,  $\Phi 1(t)$ ,  $\Phi 2(t)$ ,  $\Phi 3(t, \beta)$ , перечисление которых дано в порядке возрастания вычислительной сложности.

Для всех функционалов можно ввести пороговый критерий  $Det(t)$  потери соосности. Поэтому представляется целесообразным выбрать наиболее простой вариант – проверку превышения выбранного порога последовательностью  $THW^+(t)$ :

$$Det(t) = \begin{cases} 1, & THW^+(t) > Th_T; \\ 0, & THW^+(t) \leq Th_T. \end{cases}$$

На рабочем этапе эксплуатационного контроля вычисляются  $THW^+(t)$ , сравниваются с выбранным порогом и автоматически принимается решение о критической ситуации.

## Заключение

1. Продемонстрирована принципиальная возможность получения алгоритма контроля состояния многовального ГТД по вибросигналу применительно к распознаванию потери соосности валов на основе формализованной задачи распознавания последовательности состояний сложного источника.

2. Алгоритм не требует больших ресурсов памяти и сложных вычислений, поэтому может быть использован в реальном времени.

3. Представляется целесообразным исследовать возможность получения подобных алгоритмов кон-

троля, которые будут инвариантны к направлению измерения вибраций и позволяют оценивать величину отношения  $A_{\text{рвд2}}/A_{\text{рвд}}$ .

## Литература

1. Карасев В.А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В.А. Карасев, И.П. Максимов, М.К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.
2. Коровин Б.Б. Идентификация опасных динамических процессов в ГТД по вибросигналу / Б.Б. Коровин, В.В. Червонюк // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев, 1984. – Вып. 11. – С. 155-158.
3. Грызлова Т.П. Формализация задачи распознавания последовательности состояний сложного источника / Т.П. Грызлова // Математические ме-

тоды распознавания образов – 14-я Всероссийская конференция (Владимирская обл., г. Суздаль): сб. докладов. – М.: МАКС Пресс, 2009. – С. 333-337

4. Грызлова Т.П. Проблемы анализа сигналов сложных источников / Т.П. Грызлова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 6/63. – С. 80-87.

5. Результаты наземных и летных испытаний опытного двигателя НК-93 на летающей лаборатории Ил-76 №3908 / Бычков В.И., Коровин Б.Б., Данковцев Н.А. Н.А., Былинкина О.Н., Стасевич А.А. и др. // Научно-технический отчет ЛИИ №189-08-III. – 2008. – 214 с.

6. Былинкина О.Н. Особенности динамического нагружения редукторного ТВВД с закапотированным биротативным винтовентилятором / О.Н. Былинкина, Б.Б. Коровин // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – № 3. – С. 8-14.

Поступила в редакцию 28. 05. 2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, зам. Ген. конструктора М.Е. Колотников, ФГУП ММП «Салют», Москва.

## АПРОБАЦІЯ МЕТОДУ ЧАСОВОГО АНАЛІЗУ СТАНУ БАГАТОВАЛЬНОГО ГТД НА ОСНОВІ МОДЕЛІ СКЛАДНОГО ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ СПІВОСНІСТІ ЙОГО ВАЛІВ

*Б.Б. Коровін, Т.П. Грызлова, О.М. Билинкіна*

На підставі спектрального аналізу реальних вібропроцесів багатовального ГТД (газотурбінного двигуна) була обрана діагностична ознака утрати соосності його валів. Проведено розглядання контролю стану роторних систем до виявлення вказаної ознаки. Традиційний алгоритм будується на користуванні вузько-смугастої цифрової фільтрації кратно-роторних складових вібропроцесів, які задані. Розпочата спроба одержання алгоритмів контролю на основі моделі складного джерела, яка формалізована методами математичної теорії проектування обчислювальних систем. Було показано, що одержані таким засобом алгоритми, можуть бути ефективно використані для контролю стану роторів у реальному масштабі часу. Обговорено позитивні якості та перспективи застосування одержаних таким чином алгоритмів.

**Ключові слова:** турбогвинтовентиляторний двигун, діагностична ознака, складне джерел, гвинтовентилятор, розпізнавання послідовності, розпізнавання стану, вібропроцес, спектр, гармонія, півхвилі, контроль, реальний час.

## PROPFAN CONDITION TIME ANALYSIS TECHNIQUE APPROBATION BASED ON THE COMPLEX SOURCE MODEL FOR ENGINE SHAFTS COAXIAL MONITORING

*B.B. Korovin T.P. Gryzlova, O.N. Bylinkina*

Resting on the multi-spool GTE vibration spectrum analysis diagnostics feature of the shaft coaxial breaking have been chosen. Algorithms of the rotor systems condition monitoring according above mentioned diagnostics feature considered. Traditional one is based on the tracking digital filter for specify multiple rotor speed vibration components. Successful attempt have been done for the alternative monitoring algorithms obtaining on the base of complex source model analysis, formulized with the help of mathematical theory of calculation systems developing. It was shown that such algorithms may be effective used for real time rotors monitoring condition.

**Key words:** high-bypass turbofan, diagnostic feature, complex source, propfan, states recognition, vibration process, spectrum, harmonic, monitoring, real time.

**Коровин Борис Борисович** – д-р техн. наук, начальник лаборатории НИО-3 ФГУП «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.

**Грызлова Татьяна Павловна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных систем Рыбинской государственной технологической академии им. П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: kntnpgryzlova@mail.ru.

**Былинкина Ольга Николаевна** – начальник сектора НИО-3 ФГУП «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.

УДК 629.7.018

А.Н. ПОНОМАРЕВ, А.В. СИЧЕВОЙ

Днепропетровский национальный университет, Украина

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПУЛЬСНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

*Исследования направлены на повышение уровня надежности изделий авиационно-космической отрасли. Описано применение систем функциональной диагностики при стендовых испытаниях. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований элементов автоматики пневмогидравлических систем питания жидкостных ракетных двигателей. Представлена методика обработки экспериментальных данных импульсно-акустического метода диагностики с использованием математического аппарата распознавания образов. Приведены решающие правила распознавания технического состояния объекта диагностирования по результатам испытаний.*

**Ключевые слова:** техническая диагностика, контроль, испытания, надежность, вибродиагностика.

### Введение

Проектирование и производство сложных технических систем, к которым относится современная ракета-носитель и другие летательные аппараты, требует обеспечения их надежности и безаварийной эксплуатации.

Для достижения требуемого уровня надежности изделий авиационно-космической техники применяется широкий спектр методов испытаний на всех этапах жизненного цикла.

Одной из ответственных систем ракеты-носителя является пневмогидравлическая система питания жидкостной ракетной двигательной установки (ПГСЖ ЖРДУ) [1].

Разработка новых и совершенствование существующих методов контроля и диагностики является одним из способов повышения проектно-технологической надежности изделий авиационно-космической техники. Отдельное место занимает система функциональной диагностики (СФД), ее особенность заключается в том, что для ее работы на испытуемый объект не подаются никакие воздействия от средств диагноза [2].

Применение систем функциональной диагностики при стендовых и летных испытаниях существенно повышает надежность и работоспособность ракетно-космической техники. Разработка СФД включает в себя подбор метрологического оборудования, комплекс обеспечения сбора и регистрации экспериментальных данных, применение математических моделей испытуемых объектов, использование моделирования технических состояний объектов и возможных неисправностей, а также обработ-

ку полученных данных с последующим диагнозом или заключением о техническом состоянии.

### 1. Экспериментальная часть

На основании проведенного исследования конструкций элементов автоматики ПГСЖ ЖРДУ определены объекты диагностирования – электропневмоклапаны (ЭПК), электрогидроклапаны (ЭГК).

На основании статистических данных отработки и эксплуатации агрегатов автоматики, производства для указанных конструкций определены наиболее характерные неисправности: заедание, заклинивание, появление надиров, расклепывание или расстрескивание уплотнительных элементов, попадание инородных частиц, недооткрытие, недозаккрытие, неточность срабатывания по времени.

Поставлена задача диагностирования состояния элементов автоматики ПГСЖ – клапанов, регуляторов, переключателей, детали которых при срабатывании совершают поступательное движение с остановкой.

Вследствие этого они издают кратковременный (импульсный) виброакустический сигнал, который является носителем информации о техническом состоянии объекта.

Измерения и последующая обработка с использованием методов анализа для ударной вибрации позволяет использовать данный сигнал в качестве контролируемого параметра функциональной диагностики [3 – 5].

Для предварительной экспериментальной отработки методики был выбран серийный нормально закрытый ЭПК прямого действия.

Для проведения исследований разработана и смонтирована экспериментальная установка, состоящая из платформы для закрепления исследуемого клапана и сопряженного трубопровода, измерительных датчиков акустики и вибрации, аналого-цифрового преобразователя и ЭВМ.

На этапе испытаний в качестве измеряемых контролируемых параметров регистрировались акустические сигналы и значения вибраций на клапане и сопряженном элементе трубопровода.

Для испытаний были отобраны пять исправных одинаковых клапанов из одной партии, прошедших заводской контроль.

На первом этапе производились многократные испытания работоспособных клапанов. При испытаниях регистрировался временной процесс длительностью 6 мс (300 точек отсчета). На основании этих испытаний были получены усредненные эталонные значения контролируемых параметров для исправных клапанов (виброакустические портреты исправных объектов).

На втором этапе моделировались неисправные состояния клапанов. Поочередно искусственно вносились конкретные характерные неисправности. Для каждой неисправности повторялась процедура измерений. В результате получены усредненные «портреты неисправных состояний клапанов».

## 2. Анализ полученных результатов

Анализ и обработка полученных данных проводились с применением статистических методов распознавания образов – оценивался разбег измеряемых значений контролируемого сигнала, проводились сравнения энергетических показателей [6].

Для обработки экспериментальных данных применялась следующая методика:

1. Исходные данные:

$X_{ij}(k)$  – функция исходного сигнала;

$i = 1, 2...m$ ,  $m = 5$  – номер клапана;

$j = 1, 2...n$ ,  $n = 20$  – номер реализации измерения;

$k = 1, 2...N$ ,  $N = 100$  – дискретные отсчеты.

2. Загрузка исходных данных:

$X_{1j}(k), X_{2j}(k), X_{3j}(k), X_{4j}(k), X_{5j}(k)$ .

3. Последовательность обработки сигнала:

3.1. Нормирование сигнала

$$S_{ij}(k) = \frac{X_{ij}(k)}{\sqrt{\mathcal{E}_{ij}}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ij}^2(k)$  – энергия сигнала.

Нормирование обеспечивает приведение амплитуды сигналов к единому безразмерному масштабу, удобному для дальнейших операций.

3.2. Усреднение выборки для  $n = 20$  измерений каждого клапана

$$\overline{S}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij}(k). \quad (2)$$

3.3. Расчет дисперсии

$$\overline{D}_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\overline{S}_i(k) - S_{ij}(k))^2.$$

3.4. Формирование статистического портрета нормы

$$\overline{S}_H(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \overline{S}_i(k). \quad (3)$$

По результатам испытаний исправных клапанов получаем статистический портрет нормы исправного состояния.

3.5. Расчет дисперсии нормы:

$$\overline{D}_H(k) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\overline{S}_H(k) - S_{ij}(k))^2.$$

3.6. Вычисление пороговых значений нормы:  
верхний порог:

$$S_H P(k) = \overline{S}_H(k) + 2\sqrt{\overline{D}_H(k)};$$

нижний порог:

$$S_H O(k) = \overline{S}_H(k) - 2\sqrt{\overline{D}_H(k)}.$$

3.7. Расчет числовых показателей надежности (дополнение к портрету)

$$S_H = \frac{1}{mNn} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(k). \quad (4)$$

3.8. Вычисление дисперсии:

$$D_H = \frac{1}{mNn} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_H - S_{ij}(k))^2.$$

3.9. Нахождение числа выбросов в норме:

$$M_H = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M_{ij}. \quad (5)$$

Для распознавания применены следующие решающие правила:

а) экспертная оценка отклонения поведения контролируемого сигнала от нормы – в том числе визуальное сравнение характера контролируемого сигнала;

б) предварительная оценка характера сигнала, включающая сравнение нормированного сигнала  $S_j(k)$  исследуемого состояния со статистическим портретом нормы  $\overline{S_n}(k)$  и пороговыми значениями нормы. Если функция контролируемого сигнала «входит» в область «нормы», то его можно считать соответствующим исправному состоянию агрегата;

в) сравнение числовых показателей – нормального отклонения и дисперсии ( $S_n, D_n$ ) для заведомо исправного и исследуемого клапанов;

г) оценивание числа выбросов из «нормы» ( $M_n$ ) для заведомо исправного и исследуемого клапанов;

д) сравнение энергетических характеристик контролируемого сигнала для исправного и исследуемого клапанов.

Поведение сигнала, регистрируемого во всех точках измерения при наличии неисправности, существенно отличается от сигналов, полученных на исправном клапане. Имеют место как аномальные выбросы по амплитуде сигналов, так и отклонения по времени появления максимумов амплитуд виброускорений и акустического сигнала. Это позволяет по первой оценке подтвердить наличие аномалий в работе клапана.

Предварительная оценка характера контролируемого сигнала дает следующие результаты – при деформации штока или разрушении уплотнительного элемента статистические портреты выходят за пороговые отклонения нормы. Аналогичная ситуация наблюдалась и при просадке уплотнительного элемента клапана.

Наличие неисправностей такого рода и степени диагностируется уверенно по статистическому портрету контролируемых сигналов. Засорение клапана посторонними частицами по статистическим характеристикам виброакустического сигнала практически находится в пределах нормы. Это же имело место и при незначительных перекосах уплотнительных элементов.

Информативность энергетической характеристики сигнала в отношении диагностирования неисправностей типа засорения клапана несколько выше, чем приведенных статистических характеристик. Сравнение энергии как акустического сигнала, так и сигнала виброускорений позволяет идентифицировать неисправность, обусловленную попаданием посторонних частиц в зазор седло-тарель.

Однако, и в случае использования энергетических характеристик, однозначного распознавания характера неисправности, тем более, степени развития неисправности, получить не удастся. Констатируя, в общем случае, работоспособность и информа-

тивность способа импульсно-акустической диагностики элементов автоматики, приходится признать необходимость дальнейшей экспериментальной отработки метода.

При этом представляется целесообразным как проведение испытаний элементов автоматики различных типов с различными неисправностями, с целью набора статистической информации, так и расширение перечня решающих правил.

В частности, наиболее информативным может быть частотный анализ контролируемого сигнала.

Также для идентификации применялись методы спектрального анализа, которые дали более уверенные результаты, что позволило выделить информативные компоненты исследуемых сигналов.

Для утверждения результатов идентификации применялись методы математического моделирования, внедрение которых позволило подтвердить работоспособность, достоверность и информативность предлагаемой методики.

## Заключение

Разработанная методика с высокой степенью достоверности позволяет определять техническое состояние объекта диагностирования как исправное или выявить наличие характерных дефектов.

Экспериментальная отработка и предложенная методика обработки результатов показала работоспособность метода. Разработанный и изготовленный экспериментальный стенд позволяет исследовать различные типы элементов автоматики ПГСРПН.

Полученные результаты могут быть использованы в других научных исследованиях, а также в практических задачах испытаний различных элементов и узлов вновь создаваемых изделий авиационно-космической техники.

Разработанная методика может быть также использована в других отраслях народного хозяйства.

## Литература

1. Беляев Н.М. *Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование: Учеб. пособие для техн. ВУЗов* / Н.М. Беляев, Е.И. Уваров, Ю.М. Степанчук. – М.: Высш. шк., 1988. – 271 с.
2. Лихачев В.Я. *Техническая диагностика ПГС ЖРД* / В.Я. Лихачев, А.С. Васин. – М.: Машиностроение, 1983. – 204 с.: ил.
3. Биргер И.А. *Техническая диагностика* / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.
4. Генкин М.Д. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов* / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

5. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 5 – Измерения и испытания. – М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – С.Пб.: Питер, 2002. – 608 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Н. Петренко, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.

**ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ІМПУЛЬСНО-АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ  
ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИКИ  
АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

***О.М. Пономарьов, О.В. Січевий***

Дослідження направлені на підвищення рівня надійності виробів авіаційно-космічної галузі. Описано застосування систем функціональної діагностики при стендових випробуваннях. Розглядаються результати експериментальних досліджень елементів автоматики пневмогідравлічних систем живлення ракетних двигунів. Наведена методика обробки експериментальних даних імпульсно-акустичного методу діагностики із застосуванням математичного апарату розпізнання образів. Наведені вирішальні правила розпізнання технічного стану об'єкта діагностування по результатам випробувань.

**Ключові слова:** технічна діагностика, контроль, випробування, надійність, вібродіагностика.

**TEST RESULTS PROCESSING OF PULSING - ACOUSTIC METHODS  
FOR DIAGNOSTIC OF ELEMENTS OF AN AUTOMATICS  
OF AEROSPACE TECHNIQUES**

***A.N. Ponomaryov, A.V. Sichevoy***

Researches are directed on increase of a level of reliability of products of aerospace branch. Application of systems of functional diagnostics is described at bench tests. Results of experimental researches of elements of automatics of pneumatichydraulic power supply systems of liquid rocket engines are considered. The technique of processing of experimental data of a pulsing-acoustic method of diagnostics with use of the mathematical technology of recognition of images is presented. Deciding rules of recognition of a technical condition of object of diagnosing by results of tests are resulted.

**Key words:** technical diagnostics, control, testing, reliability, vibration-based diagnostics.

**Пономарев Александр Николаевич** – старший преподаватель кафедры энергетики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета им. О.Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: alen\_x@mail.ru.

**Сичевой Алексей Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедры энергетики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета им. О.Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: asi@ua.fm.

УДК 004.9:629.7.06

Ю.С. АФОНИН<sup>1</sup>, Т.В. МАНИЛО<sup>1</sup>, В.Н. ХАРИТОНОВ<sup>2</sup>, В.И. ДУБРОВИН<sup>1</sup><sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет, Украина<sup>2</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## ОБЗОР МЕТОДОВ И РЕАЛИЗАЦИЙ ЗАЩИТЫ ГТД ПРИ АВАРИЙНОМ РАССОЕДИНЕНИИ ТРАНСМИССИИ

Статья посвящена обзору существующих способов защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии. Представлена классификация методов и реализаций защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии. Выделены преимущества и недостатки рассматриваемых методов и способов реализаций защиты ГТД. Рассмотрен метод обнаружения рассоединения трансмиссии, основанный на исследовании характеристик сигналов с датчиков частоты вращения турбокомпрессора и ротора силовой турбины, а именно анализа данных сигналов с помощью вейвлет-фильтров, последующего извлечения информативных признаков о факте рассоединения трансмиссии, и, соответственно, получения управляющего сигнала на клапан ограничения подачи топлива. Рассмотрены способы усовершенствования рассмотренных методов.

**Ключевые слова:** аварийное рассоединение трансмиссии, защита ГТД, раскрутка вала, частота вращения, вейвлет-фильтр, ограничение подачи топлива.

### Введение

Одним из важных объектов наблюдения в процессе функционирования ГТД является вал силовой турбины (СТ). Поскольку его скорость вращения достигает несколько тысяч оборотов в секунду, его поломка (рассоединение трансмиссии) может случиться внезапно и быстро. Процесс поломки вала происходит в доли секунды, что может привести к мгновенным катастрофическим последствиям двигателя, в котором компоненты вращения переднего фрагмента тут же замедляются, в то время как компоненты вращения заднего фрагмента начинают стремительно и неконтролируемо ускоряться. Такое неконтролируемое ускорение заднего фрагмента вызывает величайший риск и опасность, поскольку скорость вращения этих компонент может достигать значения, когда центробежная сила приводит к выбросу компонент и неограниченному их движению внутри корпуса двигателя. Такое свободное движение может привести как к разрушению остальных частей двигателя, так и последующему повреждению корпуса летательного аппарата (фюзеляжа).

Поскольку весь процесс происходит в пределах нескольких миллисекунд, т.е. значительно быстрее реакции экипажа, в международных Авиационных правилах АПЗЗ и JAR-T850 оговорено обязательное наличие автоматизированной системы защиты двигателя.

Разработка системы защиты двигателя при аварийном рассоединении трансмиссии чрезвычайно

актуальна, к ней должны предъявляться требования надежности, достоверности и мгновенной реакции на выявление аварийного состояния.

### 1. Классификация методов и реализаций защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии

Системы защиты ГТД можно разделить:

- по способу реализации обнаружения признаков разрыва вала:
  - механический;
  - с использованием электрической схемы;
  - электронный;
  - смешанный (напр. электромеханический);
- по способу предотвращения раскрутки вала при его разрыве:
  - с прекращением подачи топлива за счет подачи управляющего воздействия на клапан подачи топлива;
  - с рассеиванием излишней энергии за счет трения роторных и статорных частей;
- по видам источников информации о состоянии исследуемого объекта:
  - датчики частоты вращения;
  - датчики вибрации;
  - датчики давления;
  - датчики температур;
- по месту расположения датчиков:
  - в зоне переднего фрагмента (секция энергопотребления);

- в зоне заднего фрагмента (секция энергогенерации), так называемой горячей зоны (возле СТ);
- совместно в зоне переднего и заднего фрагмента;
- по виду анализируемых сигналов:
  - аналоговые;
  - цифровые;
- по методам обработки сигналов с датчиков:
  - с использованием преобразования Фурье;
  - с использованием вейвлетов;
  - с использованием других фильтров (напр. фильтров Чебышева);
  - фазово-частотный метод.

## 2. Способы контроля и предотвращения поломки вала

Во многих имеющихся на сегодняшний день решений, которые могут быть применены для предотвращения раскрутки вала, заложен механический принцип действия с использованием метода коллизии: рассеивания вращательной энергии детали за счет столкновения [1 – 4]. Данные системы предполагают использование тормозящих элементов, которые в случае поломки и осевого смещения вала, вступают во взаимодействие, тем самым поглощают вращательную энергию вала и способствуют его торможению. Такие системы имеют главный недостаток – продолжается подача топлива в камеру сгорания, что продолжает генерацию энергии раскрутки вала, что будет требовать значительного количества поглощающих энергию механизмов. Рассеивание энергии может быть достигнуто путем деформации, трения, и разрушения ротора и статора турбины. Данные разрушения требуют последующих возмещений убытков разрушенных деталей, а вполне вероятно – приведут к разрушению двигателя и его непригодности.

Еще одним известным способом решения рассматриваемой проблемы является использование механического обнаружения разрыва вала с последующим воздействием на топливный клапан для прекращения подачи топлива. Так из описания к патенту [5] двигатель включает осевую перемещающуюся деталь, которая в случае поломки вала смещается вдоль оси вала, деталь соединена таким образом, чтобы при смещении запустить топливный клапан для ограничения подачи топлива. Еще одной реализацией механического воздействия на клапан является система, заявленная в патенте [6], в которой вал, в случае его поломки во время его функционирования, при раскрутке сдвигает муфту, которая при контакте с передней частью поршня сдвигает его, что в свою очередь приводит к толчку клапа-

на и прекращению подачи топлива.

Препятствием для воплощения таких решений в промышленности является необходимость адаптации конструкции двигателя в соответствии со специфическими условиями. Также такие решения могут увеличивать массу двигателя, что является нежелательным, и требуют значительных затрат для внедрения.

На смену механическим решениям для контроля превышения скорости при разрыве вала пришли решения с использованием электрических схем

Многие известные электрические и электромеханические решения применяются для наблюдения за скоростью вращения ротора.

Весь процесс определения текущей частоты вращения должен выполняться чрезвычайно быстро, определение частоты вращения и последующий набор расчетов должны выполняться в режиме реального времени для получения максимальной скорости реакции системы на аварийную ситуацию (0,001 – 0,01с).

Система мониторинга вала [7] для обнаружения его осевого сдвига включает шестерной индуктор, установленный на валу и вращающийся с ним, пару индуктивных датчиков расположенных радиально шестерного индуктора для считывания момента прохождения зуба во время вращения вала. Шестерной индуктор имеет два набора зубьев, один имеет прямой разрез, другой – диагональный, таким образом, разница фаз между соответствующими выходными сигналами первого и второго набора зубьев изменяется при осевом смещении вала. Расположение датчиков в противоположных осевых концах шестерного индуктора также дают возможность отследить смещение вала, признаком является увеличение амплитуды сигнала, полученного с датчика из одного конца, и уменьшение амплитуды сигнала с другого датчика. Недостатком данного решения является малая достоверность результатов в различных условиях: нет однозначного уровня осевого и радиального смещения. Таким образом, проблемой является выбор граничного уровня смещения вала, при котором можно делать вывод о поломке. Также проблемой является то, что в случае поломки, вал начинает описывать в радиальной плоскости траектории, которые могут привести к разрушению датчика.

Способ обнаружения поломки вала, заявленный в патенте [8] предполагает наличие двух датчиков частоты вращения на противоположных осевых концах вала и двух счетчиков. При разрыве вала значение в первом счетчике начинает стремительно увеличиваться, счетчик выдает положительный сигнал, когда его значение превышает 360 единиц и сохраняет свою позицию более 500 мкс. Другой

счетчик выдает положительный сигнал при зафиксированной скорости вращения вала более 1000 об./мин. В данном методе выходной сигнал, который отвечает за факт поломки вала и прекращает подачу топлива, формируется путем сопоставления положительных сигналов с двух счетчиков. Недостатком является жестко заданные условия получения выходного сигнала о прекращении подачи топлива; установка одного из датчиков в горячей зоне; большое время накопления значений первого счетчика для выдачи положительного сигнала (500 мкс).

В методе распознавания поломки вала заявленном в патенте [9] наблюдается частота вращения с датчиков установленных на двух концах вала, значения частот постоянно сравниваются в режиме реального времени, и делается вывод о поломке, когда частота в сигнале полученном со стороны СТ превышает на конкретную величину частоту вращения зафиксированную с обратной стороны вала. Если наблюдается значительная разница между частотами, генерируется электрический сигнал на ограничение или прекращение подачи топлива. Расчет текущей частоты сигнала с каждого датчика выполняется в параллельных каналах путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) и арифметического процессора, сигналы с которых поступают на компаратор для определения разницы частот. Для достоверного определения присутствия заданной частоты в сигнале с помощью БПФ требуется широкое временное окно, что накладывает ограничения на скорость реакции системы при аварийном рассоединении трансмиссии. Поскольку датчики установлены на подшипниках качения, недостатком также является невозможность заменить датчики в эксплуатации. К тому же выделить текущую частоту ротора в данном случае достаточно проблематично, так как в сигнале отсутствует опорная частота СТ.

Методы использующих смешанный тип зоны установки датчиков имеют главный недостаток: достоверный выходной сигнал формируется только при наличии достоверных сигналов с двух датчиков, а поскольку один из датчиков установлен в горячей зоне, имеется большой риск его преждевременного разрушения.

В системе определения поломки вала представленной в патенте [10] используется следящее устройство, смонтированное ниже ротора СТ для обнаружения его обратного осевого движения и, соответственно, поломки вала. Система использует физическое разъединение электрической схемы, которая включает схему соединений и электронику для обнаружения поломки вала. Во избежание ложных срабатываний системы при осевых смещениях, связанных с температурными нагрузками, большое значение имеет зазор между вращающейся частью

системы уплотнения СТ и корпусом следящего устройства. В то же время при разрушении вала настраиваемый зазор может не сработать из-за значительных радиальных перемещений СТ. Следует отметить, что величина зазора будет индивидуальной для каждого двигателя.

В изобретении [11] представлена система и метод мониторинга уровня вибраций ГТД с целью диагностирования состояния различных компонент, в том числе поломки вала. Хотя определение вибрации является безопасным инструментом для наблюдения за состоянием различных компонент двигателя в процессе его функционирования, он требует тщательной фильтрации для получения информативной составляющей о состоянии вала, скорости его вращения. В данном методе анализ тенденций амплитуд используется для определения уровня вибраций в определенных частотах и при определенных условиях функционирования. Предупреждающие и аварийные уровни обеспечивают порог, при котором пилоту сообщается проблема или ее наступление. Непосредственно для обнаружения поломки вала данный метод не обеспечивает требования мгновенной реакции и отклика системы на факт поломки.

Из описания к патенту [12] известно техническое решение защиты ГТД при забросе частоты вращения вала. Оно содержит электропреобразователь со звеном выявления превышения допустимой частоты вращения, в частности, вала турбины высокого давления. Защита осуществляется подачей гидравлического сигнала электропреобразователя на клапан регулирования подачи топлива. Принцип известного решения в значительной степени основан на взаимодействии гидравлических агрегатов. В данном решении в критический момент превышения допустимой частоты вращения вала при срабатывании гидравлики может отрицательно проявиться фактор времени.

Устройство, заявленное в патенте [13], для обнаружения поломки вала турбодвигателя содержит вал, рычаг, передний и задний фрагменты которого соединены с соответствующими фрагментами вала и расположен вдоль оси внутри вала, датчик для обнаружения разницы скорости вращения между передним фрагментом рычага и вала. Основным преимуществом данной системы является уход от установки датчиков в горячей зоне (зоне заднего фрагмента). Но система имеет ряд сложностей при реализации: способ передачи электрического сигнала на вращающуюся часть; обеспечения соотношения размещения рычага внутри вала, чтобы оставшаяся часть вала не задела рычаг и не привела к его поломке ни при каких степенях удаленности зоны разрыва от опоры СТ.

Метод, заявленный в патенте [14], состоит в измерении температуры на поверхности статора, передачи сигнала температуры на средства управления, которые обеспечивают снижение скорости ротора при достижении определенной температурной границы. Ротору достаточно выполнить небольшое осевое смещение для контакта со статором, что приводит к значительному нагреву из-за трения. Хотя показатель температуры может быть информативным признаком поломки вала, в данном решении очень трудно выбрать место установки датчика температуры на статоре, поскольку в разных точках температура может значительно варьироваться. Недостатком является также низкая скорость реакции системы на изменение температуры.

В патенте ГП «Ивченко-прогресс» [15] заявлен способ защиты турбовального ГТД, содержащего ротор турбокомпрессора (ТК) и ротор СТ, при аварийном рассоединении трансмиссии его СТ путем управления топливopодачей двигателя. Предусматривает использование сигналов стандартно комплектуемых штатных датчиков: датчик частоты вращения (ДЧВ) ротора СТ, ДЧВ ротора ТК, датчик давления в системе измерителя крутящего момента. Сигналы преобразуются в определенный вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Относительные оценки АЧХ попадают в схему обобщения и сравнения. Формируется набор признаков определяющих состояние исследуемого объекта. В случае значительного изменения частоты вращения ротора СТ формируется команда на ограничение или прекращение подачи топлива. Преимуществом является исключение дополнительных индукторов и датчиков частоты вращения в области СТ.

#### 4. Краткое описание метода выявления поломки вала путем анализа сигналов с использованием вейвлетов

Для обнаружения в сигнале заданной частоты предлагается выполнять свертку сигнала с вейвлет-фильтром, и исследовать характеристики вейвлет-коэффициентов.

Предлагается исследовать сигнал на предмет наличия не только частоты СТ, но и ее несущей, а также частоты ротора ТК, для получения информации о характере изменения частоты СТ.

Важное значение при обнаружении разрыва вала имеет не только степень изменения частоты вращения вала каждого ротора, но и скорость их изменения. Поэтому при получении вейвлет-коэффициентов целесообразно исследовать их динамические характеристики.

Также разрыв вала сопровождается скачком. Выявление скачков предлагается выполнять с по-

мощью вейвлетов, так как вейвлеты хорошо подходят для выявления кратковременных импульсов.

### Заключение

На сегодняшний день способы защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии СТ или поломки вала весьма разнообразны по способу реализации и используемым методам.

Использование методов защиты ГТД при разрыве вала путем рассеивания энергии предлагается использовать как дополнительный фактор безопасности совместно с методами, которые ограничивают подачу топлива.

Что касается зоны установления датчиков, наиболее надежной является зона переднего фрагмента ротора СТ. Установление датчиков в горячей зоне (СТ) является ненадежным из-за возможного разрушения датчика, хоть и дает возможность отслеживать более точно раскрутку заднего фрагмента.

По результатам исследований перспективным следует считать активное развитие электронных систем с углублением программной части за счет усовершенствования методов обработки входных сигналов с целью получения большего объема информации о состоянии контролируемого объекта и соответствующего развития аппаратной части с точки зрения быстродействия оцифровки сигнала и его последующей обработки.

### Литература

1. Pat. 5481943 USA, Int.Cl. F16P 7/02. Safety device against rupture of rotary shaft / B. Kraeutler; assignee: Nergeco (Societe anonyme), Dunieres, France. – № 96269; filed 26.06.1993; publ. 09.01.1996.
2. Pat. 4503667 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Turbine overspeed limiter for turbomachines / D.A. Roberts; assignee: Rolls-Royce Limited, London, England. – № 539379; filed 06.10.1983; publ. 12.03.1985.
3. Pat. 0289315 USA, Int.Cl. F01D 21/00. System for dissipating energy in the event of a turbine shaft breaking in a gas turbine engine/ J.R.Bart et al; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/126407; filed 23.05.2008; publ. 27.11.2008.
4. Pat. 0126336 USA, Int.Cl. F01D 21/14. System providing braking in a gas turbine engine in the event of the turbine shaft breaking/ J.R.Bart, D.Escure, C.M.Mons, S.Rousselin; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/126648; filed 23.05.2008; publ. 21.05.2009.
5. Pat. 2930189 USA, Cl. 60-39.09. Gas turbine engine with shaft-failure control/ J.A.Petrie; assignee: Rolls-Royce Limited, Derby, England. – № 726260; filed 03.04.1958; publ. 29.03.1960.
6. Pat. 3050939 USA, Cl. 60-39.09. Gas turbine engine with shaft-failure control / F.Morley; assignee: Rolls-Royce Limited, Derby, England. – № 27101; filed

05.05.1960; publ. 29.08.1962.

7. Pat. 4833405 USA, Int.Cl. G01B 7/14. Shaft failure monitoring system using angled rotating teeth and phase detection/ P.N.Richards et al; assignee: Shlumberger Electronics(UK) Limited, UK. – № 172015; filed 23.03.1988; publ. 23.05.1989.

8. Pat. 5293774 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Shaft breakage detection apparatus/ E.M.Ratherham; assignee: Lucas Industries Public Limited Company, UK. – № 881839; filed 12.05.1992; publ. 15.03.1994.

9. Pat. 6494046 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Method and apparatus for recognition of a shaft rupture in a turbo-engine/ B.Hayess; assignee: Rolls-Royce Deutschland LTD & Co KG, DE. – № 09/622026; filed 12.11.1999; publ. 17.12.2002.

10. Pat. 6494046 USA, Int.Cl. F01D 21/06. Gas turbine engine broken shat detection system/ T.Mulera et al; assignee: Honeywell International, Inc., US. – № 09/992847; filed 14.11.2001; publ. 19.08.2003.

11. Pat. 7013210 B2 USA, Int.Cl. G01H 1/00. Vibration monitoring system for gas turbine engines/

G.M.McBrien, J.Gottwald; assignee: Goodrich Pump & Engine Control Systems, Inc., US. – № 10/801301; filed 16.03.2004; publ. 14.13.2006.

12. Pat. 75334 S2 UA. System for protection against existing allowed ripe in turbo-machine/ D.Mailard et al; assignee: SNECMA, FR. – № 0016899; filed 22.12.2000; publ. 15.04.2006.

13. Pat. 2009/0123269 USA, Int.Cl. G01P 3/56. Device for detecting breakage of a turbomachine shaft/ J.R.Bart et al.; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/270345; filed 13.11.2008; publ. 14.05.2009.

14. Pat. 2008/0178603 USA, Int.Cl. F02C 9/00. Method and device for reducing the speed in the event of breakage of a gas turbine engine turbine shaft/ C.M.Mons; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 11/875180; filed 19.10.2007; publ. 31.07.2008.

15. Пат. 32219 УА, МПК P02C 9/00. Спосіб захисту газотурбінного двигуна/ І.Ф.Кравченко та ін.; заяв. ГП «Івченко-Прогрес», УА. – №200714528; заяв. 24.12.2007; publ. 12.05.2008, Бюл.№9.

Поступила в редакцію 18.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрою «Технології авіадвигателів» А.Я. Качан, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжє.

### ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА РЕАЛІЗАЦІЙ ЗАХИСТУ ГТД ПРИ АВАРІЙНОМУ РОЗ'ЄДНАННІ ТРАНСМІСІЇ

**Ю.С. Афонін, Т.В. Маніло, В.М. Харитонов, В.І. Дубровін**

Стаття присвячена огляду наявних засобів захисту ГТД при аварійному роз'єднанні трансмісії. Представлена класифікація даних методів та реалізацій. Виділені переваги та недоліки методів і способів захисту ГТД. Розглянутий метод виявлення роз'єднання трансмісії, оснований на дослідженні характеристик сигналів з датчиків частоти обертання ротора турбокомпресора та силової турбіни, а саме аналізі даних сигналів за допомогою вейвлет-фільтрів, виявлення ознак роз'єднання трансмісії, та, відповідно, отримання управляючого сигналу на клапан подачі палива. Розглянуті способи вдосконалення розглянутих методів.

**Ключові слова:** аварійне роз'єднання трансмісії, захист ГТД, розкрутка вала, частота обертання, вейвлет-фільтр, обмеження подачі палива.

### REVIEW OF GAS TURBINE ENGINE METHODS AND IMPLEMENTATIONS IN THE EVENT OF SHAFT DECOUPLE

**Y.S. Afonin, T.V. Manilo, V.N. Haritonov, V.I. Dubrovin**

The paper is devoted to existing techniques of GTE protection in the event of shaft decouple. The classification of methods and implementations is presented. Advantages and disadvantages of these methods are pointed out. The method of shaft decouple detection using signals of turbocompressor and turbine rotor sensors is presented, namely signals using wavelet-filters analysis, further informative characteristics of shaft decouple detection and appropriate control signal generation to fuel valve. The ways to improve methods under review are examined.

**Key words:** shaft decouple, GTE protection, shaft overspeed, rotating speed, wavelet-filter, fuel limit.

**Афонин Юрий Сергеевич** – ассистент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: yuriy.zp@gmail.com

**Манило Татьяна Владимировна** – аспирант кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: tatamanilo@gmail.com.

**Харитонов Виктор Николаевич** – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03510@ivchenko-progress.com.

**Дубровин Валерий Иванович** – канд. техн. наук, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: vdubrovin@gmail.com

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ, Ю.Г. ЗОЛОТОЙ, Д.В. ДОВГАНЬ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГТД В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОЙ ВИБРАЦИИ

*Рассмотрены особенности экспериментального определения динамических параметров и напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток компрессоров ГТД при резонансной вибрации. Разработан и реализован подход к определению собственных частот и форм колебаний, основанный на рациональном сочетании методов усреднения по времени и стробоголографической виброметрии. Реализована методика расшифровки голографических интерферограмм при наличии двух направлений освещения и поворота лопатки между экспозициями. Показана адекватность результатов решения тестовой задачи. Приведены результаты определения деформированного состояния входной кромки рабочей лопатки компрессора.*

**Ключевые слова:** рабочая лопатка компрессора, напряжённо-деформированное состояние, голографическая интерферограмма, расшифровка, стробоголографическая виброметрия, собственная частота колебаний, форма колебаний,

### Постановка проблемы

Повышение эффективности современных ГТД сопровождается увеличением нагрузок на их элементы. Резонансная вибрация, вследствие неравномерности газового потока является причиной значительной части аварий лопаточного аппарата компрессоров [1]. Определение динамических напряжений и виброрезонансные испытания рабочих лопаток последних ступеней компрессора являются обязательными при создании современных ГТД. Как известно, в процессе натурных испытаний ГТД существуют ограничения как на максимальное количество каналов передачи информации, так и на минимальные размеры тензодатчиков. При этом, допустимое отношение напряжений в зонах максимальных их значений к измеренным тензодатчиками, как правило, не превышает двух. Все это требует размещения на рабочих лопатках компрессора минимального возможного количества тензодатчиков в зонах максимальных вибрационных напряжений.

Одним из эффективных расчетно-экспериментальных методов определения эпюры вибрационных напряжений компрессорных лопаток ГТД является метод голографической интерферометрии [2]. Колебания лопатки с консольно зашпильным хвостовиком возбуждаются сигналом звукового генератора с плавно изменяющейся частотой. Моменты возникновения резонансов наблюдаются визуально в реальном времени а, соответственно, с высокой точностью регистрируются значения собственных частот колебаний.

Формы колебаний традиционно определяют методом Пауэлла-Стетсона, записывая усреднённые по времени интерферограммы резонирующей лопатки [3].

При исследовании форм колебаний коротких лопаток с большой относительного утолщения высока вероятность получения ложной информации о дислокации узловых линий. Действительно, при усреднении по времени распределение яркости на интерферограмме соответствует соотношению [3]:

$$I = a_0^2 j_0^2(\varphi),$$

где  $I$  – яркость точки в восстановленном изображении;  $a_0$  – амплитуда предметной световой волны;  $j_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\varphi$  – изменение фазы в предметной волне при перемещении  $\bar{U}$  точки поверхности лопатки между двумя амплитудными положениями.

В геометрической модели формирования картины интерференции

$$\varphi = 2\pi \bar{K} \cdot \bar{U} / \lambda,$$

где  $\bar{K}$  – вектор чувствительности интерферометра, определяемый как разность вектора наблюдения  $\bar{K}_H$  и вектора освещения  $\bar{K}_O$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения лазера.

Как следствие, полоса с максимальной яркостью на интерферограмме будет соответствовать не только узлам колебаний ( $\bar{U} = 0$ ), но и тем точкам лопатки, где  $\bar{U} \perp \bar{K}$ . Фактически узловые линии на поверхности пера могут вовсе отсутствовать и рас-

полагаться внутри (рис. 1). Здесь на усредненных по времени интерферограммах зарегистрирована одна и та же форма колебаний при разных направлениях вектора  $\bar{K}$ . В этом случае определение формы колебаний предполагает расшифровку интерферограммы – определение виброперемещений во всех точках пера лопатки.

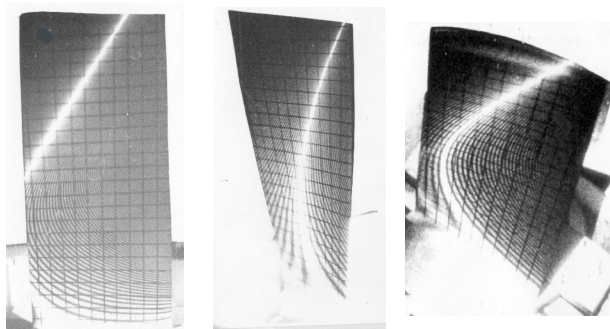


Рис. 1. Усредненные по времени интерферограммы колебаний лопатки при разных направлениях вектора чувствительности

Аналогичная проблема возникает при определении напряженно-деформированного состояния лопатки. Решение этой задачи предполагает процедуру дифференцирования перемещений по координатам местного базиса. Но направление этого вектора априори неизвестно. Основное соотношение голографической интерферометрии  $\bar{K} \cdot \bar{U} = N\lambda$  ( $N$  – порядок интерференционной полосы) определяет проекцию вектора  $\bar{U}$  на направление вектора  $\bar{K}$  [4]. Поэтому оптическая схема голографического стенда должна обеспечить получение как минимум трех линейно независимых уравнений вида:

$$\bar{K}_i \cdot \bar{U} = N_i \lambda \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

В этих уравнениях  $N_i$ -порядки интерференционных полос на интерферограммах с некомпланарными векторами чувствительности  $K_i$ . Система уравнений (1) традиционно реализуется путем регистрации трех голограмм с различными направлениями наблюдения или освещения. При этом оптическая схема установки становится чрезвычайно громоздкой, а эксперимент – избыточно трудоемким.

**Цель работы** – повышение точности экспериментального определения методом ГИ перемещений и НДС рабочей лопатки компрессора ГТД при резонансной вибрации.

## 1. Оптическая схема интерферометра и аппаратное обеспечение голографического стенда

При создании оптической схемы голографического интерферометра предполагалось выполнение следующих основных требований:

- возможность реализации системы уравнений (1);
- получение высокого контраста картины интерференции для надёжного считывания интерферометрических данных;
- обеспечение приемлемой точности определения перемещений путем формирования набора пространственно разнесенных векторов чувствительности.

Для получения высококонтрастных интерферограмм использован метод модуляции лазерного излучения стробирующими прямоугольными импульсами регулируемой скважности. С этой целью сигналом генератора вибровозбуждения лопатки запускался генератор прямоугольных импульсов, которые после усиления до полуволнового напряжения подавались на электрооптический модулятор излучения. С помощью фазовращателя стробирующие импульсы синхронизировались с амплитудными моментами колебаний лопатки. При соответствующем подборе скважности импульсов такая стробоинтерферограмма по контрасту эквивалентна двухэкспозиционной [3].

Разработанная оптическая схема представлена на рис. 2.

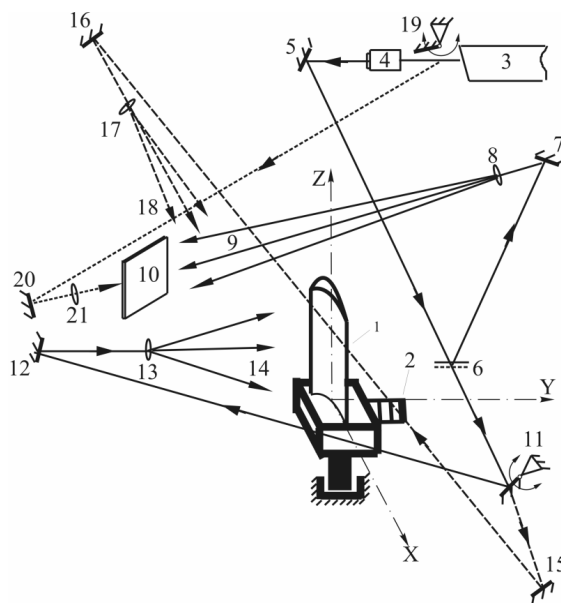


Рис. 2. Оптическая схема голографического интерферометра.

В ней исследуемая лопатка 1 в специальном зажиме укреплена на горизонтальной платформе поворотного устройства. В корпус зажимного устройства вмонтирован пьезоэлектрический вибровозбудитель 2. Прецизионные подшипники и использование в качестве привода шагового двигателя с редуктором позволяют повернуть лопатку вокруг вертикальной оси  $z$  на заданный угол и затем вернуть ее в исходное положение с интерферометрической точностью (менее половины длины волны).

Для определения соответствия между картиной интерференции и координатами точек поверхности на лопатку нанесена разметочная сетка по расчетным сечениям.

Источником когерентного излучения служит He – Ne – лазер ЛГН-215 3. Его луч проходит через модулятор излучения МЛ-3 4 и зеркалом 5 направляется на светоделитель 6. Отраженный от него луч с помощью зеркала 7 и микрообъектива 8 формирует опорную волну 9, падающую на фотопластинку 10, где происходит регистрация голограммы. Из луча, который прошел через светоделитель, зеркалами 11, 12 и микрообъективом 13 формируется освещающий лопатку пучок 14. Зеркало 11 смонтировано на цилиндрическом шарнире, который позволяет убрать его из луча и снова вернуть в исходное положение. Таким образом, можно оперативно с помощью зеркал 15, 16 и микрообъектива 17 заменить освещающий пучок 14 на пучок 18 и наоборот.

При проведении эксперимента сначала последовательно записываются две интерферограммы с векторами освещения  $\bar{K}_{O1}$ ,  $\bar{K}_{O2}$  и вектором наблюдения  $\bar{K}_{H1}$ . После поворота лопатки на заданный угол регистрируются еще две интерферограммы (замена освещающих пучков производится в

обратном порядке), которым соответствуют векторы освещения  $\bar{K}_{O3}$ ,  $\bar{K}_{O4}$  и вектор наблюдения  $\bar{K}_{H2}$ .

Особенностью оптической схемы является наличие шарнирно закрепленного зеркала 19. В рабочем положении оно отражает луч лазера на зеркало 20, после которого объективом 21 формируется световая волна, сопряженная опорной. При этом с голограммы 10 действительное изображение интерферограммы проектируется на поверхность лопатки и фотографируется цифровой фотокамерой. При этом по сравнению с мнимым изображением удастся существенно улучшить разрешение и контраст интерференционных полос.

Таким образом, четыре направления освещения при двух направлениях наблюдения интерферограммы дают возможность для каждой реперной точки на поверхности лопатки составить систему уравнений

$$\begin{cases} \bar{U}(\bar{K}_{H1} - \bar{K}_{O1}) = N_1 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H1} - \bar{K}_{O2}) = N_2 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H2} - \bar{K}_{O3}) = N_3 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H2} - \bar{K}_{O4}) = N_4 \cdot \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

В декартовых координатах глобального базиса лопатки эти уравнения приобретают вид:

$$\begin{cases} U_x \left( \frac{x_{H1} - x}{r_{H1}} + \frac{x_{O1} - x}{r_{O1}} \right) + U_y \left( \frac{y_{H1} - y}{r_{H1}} + \frac{y_{O1} - y}{r_{O1}} \right) + U_z \left( \frac{z_{H1} - z}{r_{H1}} + \frac{z_{O1} - z}{r_{O1}} \right) = N_1 \lambda; \\ U_x \left( \frac{x_{H1} - x}{r_{H1}} + \frac{x_{O2} - x}{r_{O2}} \right) + U_y \left( \frac{y_{H1} - y}{r_{H1}} + \frac{y_{O2} - y}{r_{O2}} \right) + U_z \left( \frac{z_{H1} - z}{r_{H1}} + \frac{z_{O2} - z}{r_{O2}} \right) = N_2 \lambda; \\ U_x \left( \frac{x_{H2} - x}{r_{H2}} + \frac{x_{O3} - x}{r_{O3}} \right) + U_y \left( \frac{y_{H2} - y}{r_{H2}} + \frac{y_{O3} - y}{r_{O3}} \right) + U_z \left( \frac{z_{H2} - z}{r_{H2}} + \frac{z_{O3} - z}{r_{O3}} \right) = N_3 \lambda; \\ U_x \left( \frac{x_{H2} - x}{r_{H2}} + \frac{x_{O4} - x}{r_{O4}} \right) + U_y \left( \frac{y_{H2} - y}{r_{H2}} + \frac{y_{O4} - y}{r_{O4}} \right) + U_z \left( \frac{z_{H2} - z}{r_{H2}} + \frac{z_{O4} - z}{r_{O4}} \right) = N_4 \lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_x, U_y, U_z$  – проекции вектора виброперемещения исследуемой точки на оси координат;

$r_{Hi} = \sqrt{(x_{Hi} - x)^2 + (y_{Hi} - y)^2 + (z_{Hi} - z)^2}$  – модуль вектора, соединяющего исследуемую точку с координатами  $(x, y, z)$  с  $i$ -й точкой наблюдения,

$r_{Oi} = \sqrt{(x_{Oi} - x)^2 + (y_{Oi} - y)^2 + (z_{Oi} - z)^2}$  – модуль вектора, соединяющего  $i$ -ю точку освещения с исследуемой точкой.

Если  $N_i$  определены только по модулю, то из системы уравнений (3) любые три решаются совместно, а четвертое служит для определения истинной

комбинации знаков полос. Если же знаки порядков полос известны заранее, то система (3) решается методом наименьших квадратов.

Коэффициент левой части уравнений (3) определяются геометрией лопатки и геометрией оптической схемы, причем координаты точек освещения и наблюдения удобно представить в глобальной системе координат лопатки. С этой целью спроектировано и изготовлено специальное координатное устройство. Его работа основана на измерении углов между сканирующими в одной плоскости лучами лазерных диодов и осью вращения этой плоскости. Опыт показал хорошую точность и надежность результатов таких измерений.

Порядки интерференционных полос определялись с помощью компьютерной программы в полуавтоматическом режиме. С целью уменьшения случайных осцилляций определения дробных частей полос производилась аппроксимация и сглаживание массивов  $N_i$  вариационной кубической сплайн-функцией [5].

При определении коэффициентов кубической сплайн-функции используются следующие условия:

- 1) значения полиномов на концах интервалов равны заданным экспериментальным значениям;
- 2) первые и вторые производные для последовательных полиномов в узлах должны быть одинаковы.

Вторая производная от кубических полиномов на каждом интервале  $[z_j, z_{j+1}]$  является линейной функцией. Используя условия 1 и 2, кубические сплайны на этом отрезке можно привести к виду:

$$S_j(z) = \frac{A_j}{6h_j}(z_{j+1} - z)^3 + \frac{A_{j+1}}{6h_j}(z - z_j)^3 + \left( \frac{N_{j+1}}{h_j} - \frac{h_j}{6} A_{j+1} \right) (z - z_j) + \left( \frac{N_j}{h_j} - \frac{h_j}{6} A_j \right) (z_{j+1} - z), \quad j = 1, 2, \dots, L-1, \quad (4)$$

где  $A_j$  – значение второй производной в точке  $z_j$ ;  $N_j$  – значение порядка полос в узловой точке  $z_j$ ;  $h_j = z_{j+1} - z_j$ ;  $L$  – количество узлов.

Для определения коэффициентов  $A_j, A_{j+1}$  воспользуемся равенством первых производных для сплайнов в узловых точках. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\frac{h_{j-1}}{6} A_{j-1} + \frac{h_j + h_{j-1}}{3} A_j + \frac{h_j}{6} A_{j+1} = \frac{1}{h_j} (N_{j+1} - N_j) - \frac{1}{h_{j-1}} (N_j - N_{j-1}), \quad j = 2, 3, \dots, L-1. \quad (5)$$

Система уравнений (5) состоит из  $L-2$  уравнений с  $L$  неизвестными  $A_1, A_2, \dots, A_L$ . Недостаёт ещё двух уравнений. В работе [5] два недостающих уравнения были получены приравнением нулю вторых производных  $A_1$  и  $A_L$  в точках  $z_1$  и  $z_L$ . Однако численный эксперимент показал, что для аппроксимации порядков полос на концах интервала корректнее использовать интерполяционный полином Лагранжа третьего порядка.

Система линейных алгебраических уравнений (2) решалась методом прогонки [6]. В итоге получена сплайн-функция

$$S(z) = \begin{cases} S_1(z), & z_1 \leq z \leq z_2; \\ S_2(z), & z_2 \leq z \leq z_3; \\ \dots & \dots \\ S_{L-1}(z), & z_{L-1} \leq z \leq z_L, \end{cases} \quad (6)$$

точно проходящая через экспериментальные значения  $N_j$ . Очевидно, что погрешность определения  $N_j$  не превышает половины полосы:  $|N_j - f(z_j)| \leq \delta$ ,

где  $f(z_j)$  – точные значения порядков полос в узловых точках, а  $\delta = 0,5$ .

Сглаживание порядков полос проводилось путём численного варьирования с малым шагом значений  $N_j$  в пределах  $\pm \delta$ . Каждая вариация сопровождалась определением среднеквадратичной кривизны  $I$  сплайна (6) и среди всех возможных выбиралась функция с минимальной кривизной:

$$I(z) = \int_{z_1}^{z_L} [S''(z)]^2 dz = \min.$$

## 2. Методика определения НДС

Расчёт деформаций поверхности вибрирующей лопатки по определённому ранее полю виброперемещений осложняется значительной относительной толщиной, большими углами. Использование гипотез тонких оболочек для этой задачи не достаточно корректно. Поэтому расчёт деформаций производился по формулам Коши:

$$\varepsilon_{x_1} = \frac{\partial U_{x_1}}{\partial x_1}; \quad \varepsilon_{z_1} = \frac{\partial U_{z_1}}{\partial z_1}; \quad \gamma_{x_1 z_1} = \frac{\partial U_{x_1}}{\partial z_1} + \frac{\partial U_{z_1}}{\partial x_1}, \quad (7)$$

где  $x_1$  и  $z_1$  – оси локальной системы координат, касательные к поверхности лопатки в данной точке  $M$  (рис. 3), а ось  $y_1$  к ним перпендикулярна.

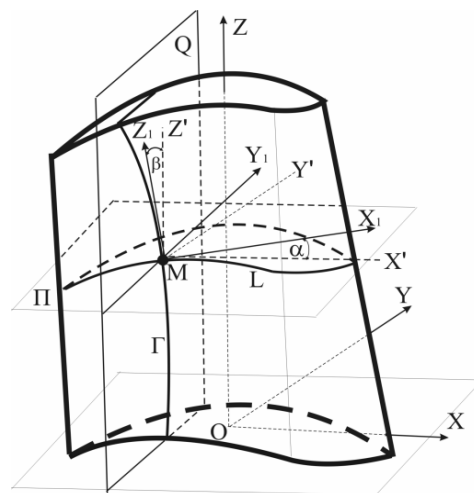


Рис. 3. Определение ориентации местного базиса на поверхности лопатки.

Для определения ориентации локального базиса  $X_1 Y_1 Z_1$  относительно глобальной системы координат  $XYZ$  используются данные чертежа лопатки, в котором координаты точек поверхности спинки и корыта лопатки заданы таблично в сечениях, параллельных плоскости  $XOY$ . Поверхность лопатки оп-

ределена функцией  $Y = f(x, z)$ , заданной таблично. Представим ее в виде совокупности функций от каждой переменной отдельно:

$$y(x, z) = \begin{cases} f_l(x) & z = z_l, \quad l = 1, 2, \dots, K_1; \\ \varphi_m(z) & x = x_m, \quad m = 1, 2, \dots, K_2, \end{cases}$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – количество соответствующих сечений по высоте лопатки.

Важно, что функции  $f_l(x)$  и  $\varphi_m(z)$  определяют аналитически на базе сплайн-аппроксимации. На рис. 4 им соответствуют линии L и Г, образованные в сечениях лопатки плоскостями П и Q. Углы  $\alpha$  и  $\beta$ , образованные осями  $x_1$  и  $z_1$  местного базиса с направлениями осей X и Z, определяются из соотношений:

$$\operatorname{tg} \alpha_i(x) = \frac{d}{dx}(f_i(x)), \quad i = 1, 2, \dots, K_1;$$

$$\operatorname{tg} \beta_m(z) = \frac{d}{dz}(\varphi_m(z)), \quad m = 1, 2, \dots, K_2$$

Тогда связь между проекциями перемещения точки поверхности лопатки на оси локальной и глобальной систем координат приобретает вид:

$$\begin{cases} U_{X_1}(x, z) = U_X(x, z) \cos \alpha(x) + U_Y(x, z) \sin \alpha(x); \\ U_{Z_1}(x, z) = [U_X(x, z) \sin \alpha(x) - U_Y(x, z) \cos \alpha(x)] \times \\ \times \sin \beta(z) + U_Z(x, z) \cos \beta(z). \end{cases} \quad (8)$$

Считая НДС в местном базисе плоским и подставляя зависимости (8) в формулы Коши (7), определим деформации поверхности лопатки из соотношений:

$$\begin{cases} \varepsilon_{X_1}(x, z) = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial x_1} = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial x} \cos \alpha(x); \\ \varepsilon_{Z_1}(x, z) = \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial z_1} = \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial z} \cos \beta(z); \\ \gamma_{X_1 Z_1}(x, z) = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial z} \cos \beta(z) + \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial x} \cos \alpha(x). \end{cases}$$

Значения механических напряжений вычислялись по формулам теории упругости:

$$\sigma_{z_1} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{z_1} + \mu \varepsilon_{x_1}); \quad \sigma_{x_1} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{x_1} + \mu \varepsilon_{z_1});$$

$$\tau_{x_1 z_1} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \gamma_{x_1 z_1}.$$

### 3. Результаты исследований

#### 3.1. Оценка адекватности методики

Для проверки разработанной методики проведен тестовый эксперимент по определению дефор-

мированного состояния стальной прямоугольной пластинки 63\*41\*3 мм с одним жестко защемленным краем, колеблющейся на первой изгибной форме. На рис. 5, а показана одна из стробоинтерферограмм, по которым производился расчет деформаций.

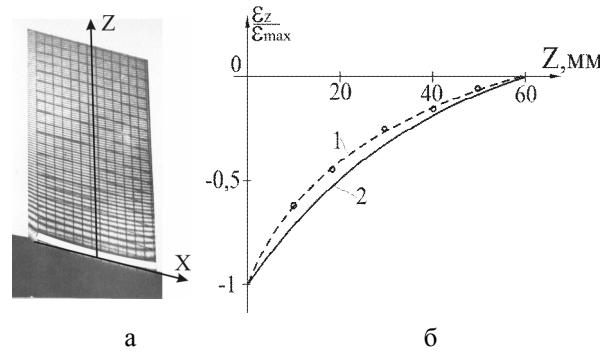


Рис. 5. Определение деформированного состояния прямоугольной пластинки

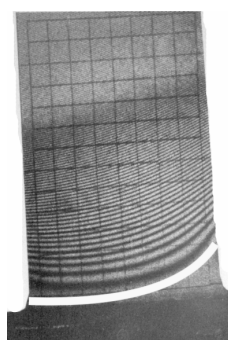
Полученное распределение деформаций  $\varepsilon_z / \varepsilon_{\max}$  вдоль оси Z представлено в нормированном виде на рис. 5б (линия 1). Для сравнения приведено рассчитанное теоретически распределение деформаций  $\varepsilon_z$  (линия 2) [7]. Согласование результатов вполне удовлетворительное.

#### 3.2. Исследования НДС лопатки компрессора

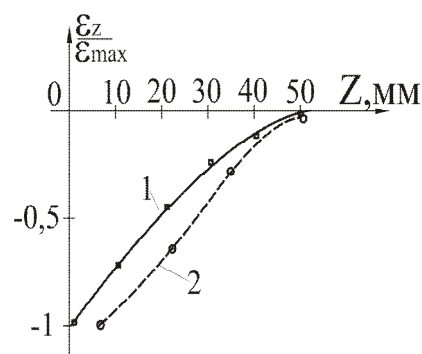
Результаты исследования деформированного состояния поверхности корытца лопатки, реализующие изложенный подход, при колебаниях на первой изгибной, первой крутильной и второй крутильной формах приведены ниже (рис. 6 – 8).

На рис. 6, а – 8, а представлены стробоинтерферограммы этих форм колебаний с отмеченными нулевыми линиями. Дислокация нулевых полос определялась по голограммам, усредненным во времени. На рис. 6, б – 8, б показаны в нормированном виде эпюры распределения линейных деформаций вдоль входной кромки лопатки (линия 1), определённые по данным расшифровки голографических интерферограмм. Результаты тензометрирования входной кромки представлены линиями 2. Наблюдается вполне удовлетворительная корреляция результатов.

Анализ распределения деформаций по входной кромке рабочей лопатки компрессора на данных колебательных модах показывает, что максимально нагруженными являются корневое сечение (на первой изгибной форме), и сечение  $Z = 20 \dots 30$  мм (на второй изгибной форме). В то же время, значения линейных деформаций  $\varepsilon_z$  по входной кромке на первой крутильной форме далеки от экстремальных.

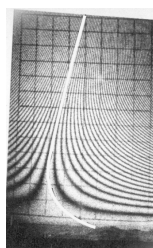


а

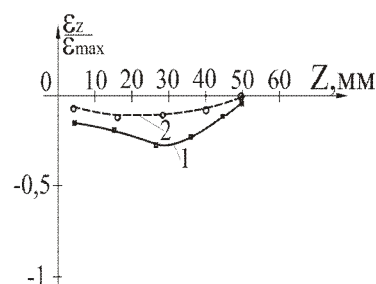


б

Рис. 6. Деформации входной кромки лопатки на первой изгибной форме

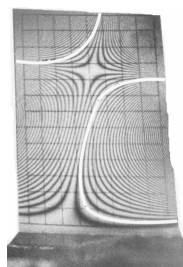


а

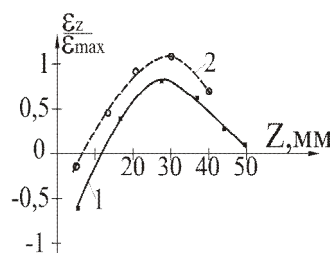


б

Рис. 7. Деформации входной кромки лопатки на первой крутильной форме



а



б

Рис. 8. Деформации входной кромки лопатки на второй крутильной форме.

Таким образом, полученные эпюры позволяют в дальнейшем при проведении натурных испытаний оптимизировать препарировку лопатки тензорезисторами, разместив их в местах локализации максимальных вибронапряжений.

### Заключение

1. Разработан и реализован подход к определению собственных частот и форм колебаний, основанный на рациональном сочетании методов усреднения по времени и стробоголографической виброметрии.

2. Реализована методика расшифровки голографических интерферограмм при наличии двух направлений освещения и поворота лопатки между экспозициями.

3. Применительно к рабочей лопатке компрессора ГТД получены эпюры деформаций, обеспечивающие оптимальную препарировку лопатки при натурных испытаниях.

### Литература

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Макаева Р.Х. Диагностика технического состояния, разрушения деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии: дисс ... д-ра техн. наук; 05.07.03, 05.07.05 / Р.Х. Макаева. – Казань, 2009. – 420 с.
3. Островский Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций /

Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев.  
– М.: Наука, 1988. – 360 с.

4. Казачек А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике / А.Г. Казачек. – М.: Машиностроение, 1984. – 175 с.

5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.

6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

7. Справочник по строительной механике корабля: т. 3. Судостроение / Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А. и др. Л., 1982. – 640 с.

Поступила в редакцию 20.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОГРАФІЧНОЮ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЄЮ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД В УМОВАХ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ

*М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотий, Д.В. Довгань*

Розглянуто питання експериментального визначення динамічних параметрів і напружено-деформованого стану робочих лопаток компресорів ГТД при резонансній вібрації. Викладена методика визначення власних частот і форм коливань при поєднанні методу усереднення за часом та методу стробоголографічної віброметрії. Запропонована методика розшифровки голографічних інтерферограм передбачає наявність двох напрямів освітлення та поворот лопатки між експозиціями. Виконана перевірка адекватності методики на прикладі рішення тестової задачі та наведено результати визначення напружено-деформованого стану лопатки на кількох власних частотах.

**Ключові слова:** розшифровка голографічних інтерферограм, лопатка ГТД, стробоголографічна віброметрія, власні частоти та форми коливань, напружено-деформований стан.

### VIBRATION RESONANCE OSCILLATIONS COMPRESSOR ROTOR BLADES OF GTE LOW POWER METHODS OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

*M.R. Tkach, J.G. Zolotoi, D.V. Dovgan*

Problems of experimental determination of dynamic parameters and the stress strain state of rotor blades of GT compressor with resonant vibration. Stated method of determining the natural frequencies and mode shapes by combining the method of US-averaged in time with the method of strobology vibrometry. The technique of interpretation of holographic interferograms of the two-direction illumination and rotation of scapula between exposures. Completed verification of the adequacy of methods on the solution of test problems and results of determining the stress-deformed state Immunized blades on several natural frequencies.

**Key words:** decoding holographic interferograms, blade GTE, strobology vibrometry, the natural frequencies and mode shapes, stress-strain state of the blade.

**Ткач Михаил Романович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tkach@mksat.net.

**Золотой Юрий Григорьевич** – ст. преподаватель, зав. лаборатории лазерных средств измерений Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: goldspekl@ukr.net.

**Довгань Дмитрий Витальевич** – м.н.с. Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dovgan@trion.mk.ua.

УДК 261.438:534.647.083.8

Е.А. ИГУМЕНЦЕВ, Е.А. ПРОКОПЕНКО

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина

## ДЕМОДУЛЯЦИЯ ПОМПАЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В работе рассмотрены колебания давления газа, которые возбуждают вибрацию корпусов нагнетателя. Приведено сравнение узкополосного низкочастотного спектра и спектра огибающей модулированного сигнала нагнетателя и электродвигателя. В амплитудном спектре огибающей выделены пики помпажных колебаний. Анализ боковых полос спектра вибрации использован для диагностики помпажных колебаний. В спектре вибрации электродвигателя выделены частотные составляющие, характеризующие ударные импульсы, позволяющие обнаружить дефекты подшипников. Ударные импульсы в спектре проявляются в виде боковых полос частот. Демодуляция выполнена с помощью преобразования Гильберта.*

**Ключевые слова:** нагнетатель, спектр, вибрация, колебания, газотурбинный двигатель, модуляция, диагностика.

### Введение

**Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** В практике эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) отмечены режимы работы, при которых наблюдаются пульсации потока газа, сопровождавшиеся шумовым эффектом и вызывающие: циклическое изменение направления потока газа через нагнетатель. Такой режим работы назван помпажом. Помпаж приводит к выходу из строя газотурбинного двигателя (ГТД). Перечисленные последствия работы ГТД в помпажном режиме наглядно демонстрируют необходимость оснащения агрегата современной и надежной противопомпажной защитой.

**Обзор публикаций и выделение нерешенных задач.** Наиболее распространенные противопомпажные системы построены на использовании универсальной напорно-расходной характеристики нагнетателя. При этом измеряется расход и напор (степень повышения давления) газа и по этим параметрам на напорно-расходной характеристике наносится рабочая точка. Если рабочая точка ГТД находится в заранее отмеченной на характеристике зоне неустойчивой работы [1], то система выдает управляющий сигнал.

Противопомпажная система, построенная на этом принципе, обладает существенными недостатками, так как не учитывается истинное физическое состояние потока газа и запас «расхода» по помпажу определяется с помощью паспортной, а не фактической характеристики ГТД. Кроме того, снятие ре-

альной характеристики помпажа в условиях эксплуатации КС связано со значительным риском в силу возможных повреждений оборудования. Поэтому определение истинной границы помпажа, как правило, проводят один раз в год (снимают 5-6 помпажных точек). Реальная линия помпажа, полученная при этих испытаниях, с течением времени может изменять своё местоположение по отношению к характеристике ГТД [1].

Известен другой подход, основанный на спектральном анализе вибрации, где разработана система вибродиагностики, позволяющая по параметрам вибрации определить предпомпажные колебания [2]. Однако, предлагаемая система использует теплотехнические параметры: адиабатический напор и к.п.д. Такой подход требует дополнительно использовать датчики давления, температуры и расхода с целью пересчета их в теплотехнические характеристики, что сводит задачу к известному методу [1].

**Цель исследований** работы заключается в том, чтобы в спектре вибрации ГТД отыскать информативный частотный диапазон, чувствительный к различным стадиям помпажных колебаний.

### Результаты исследований

Установлено [3], что угловая частота самовозбуждения в момент появления колебаний расхода и давления (т.е. вблизи границы помпажа) определяется выражением:

$$\Omega = \frac{c_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{S_1} \varepsilon + \frac{1}{2S_2}\right) \cdot \frac{S_2 I_2 \varepsilon^{(1-k)/k}}{2}}}, \quad (1)$$

где  $c_0$  – скорость воздуха в трубе;  $l_1, l_2, S_1, S_2$  – длины и площади поперечных сечений соответственно подводящего и отводящего участка газопровода;  $\epsilon$  – степень сжатия ЦБН;  $k$  – показатель адиабаты.

Известно [4], что при дополнительных потерях в колесе ЦБН возбуждаются импульсы потока газа на лопаточных частотах. При помпаже, потери в ГТД в результате аэродинамического взаимодействия, за каждой рабочей лопаткой ступени образуют закомочный след, форма которого зависит от характера колебаний рабочих лопаток. Идеальная форма закомочного следа лопатки описывается квадратом косинуса согласно следующему выражению [2]:

$$v = v_{\max} \cos^2 \left( \frac{\pi}{4S} \right), \quad (2)$$

где  $v$  – дополнительная скорость потока в следе;  $v_{\max}$  – максимальная дополнительная скорость потока в следе;  $S$  – физическая ширина следа.

Импульс вида (2) воздействует на направляющие лопатки  $z$  раз за один оборот ротора ( $z$  – количество рабочих лопаток колеса). В спектральной области результат такого взаимодействия можно представить рядом гармоник кратности  $z$  пульсаций давления  $p(t)$  в трубопроводе:

$$p(t) = \sum_{k=1}^h A_k \cos(kz\omega t); \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

где  $A_k$  – амплитуды гармоник с частотами  $kz\omega$ ;  $\omega = 2\pi f_p$  – угловая частота вращения ротора;  $t$  – время.

Для того чтобы выделить информативную часть из общего сигнала, необходимо провести когерентное накопление с частотой вращения ротора. При этом отношение сигнал/шум на выходе накопителя будет определяться количеством усреднений. Для синхронизации начала накопления в каждом периоде, оно проводится с внешней частотой выборки кратной  $z\omega$  умноженной на 2 в степени  $n$ , где  $n$  – целое число. Низкочастотная часть сигнала (ротормые гармоники) отсекаются с помощью аналогового фильтра.

Выражение амплитуды пульсаций давления ( $A_k$ ) на лопаточных частотах  $kz\omega$  нагнетателя для прямоугольных импульсов получено в работе [4] в функции к.п.д. и геометрических размеров. Аналогичным образом, раскладывая в ряд Фурье соотношение (2) на периоде  $2\pi/z\omega$ , получены выражения для амплитуд пульсаций давления в трубопроводе на лопаточных частотах.

Совместное действие предпомпажных и лопаточных колебаний ГТД приводит к амплитудной

модуляции первой лопаточной частоты давления в трубопроводе в виде:

$$p(t) = A_1 [1 + m \cdot \cos \Omega t] \cdot \cos(z\omega t), \quad (4)$$

где  $m = A_n/A_1$  – коэффициент модуляции (отношение амплитуд помпажных и лопаточных частот).

Собственную частоту акустических колебаний газа, заключенного в цилиндрическом объеме, определяем из известного выражения [2]:

$$f_a = \frac{\alpha_{m,n} \sqrt{m_r R_r T_r z_r}}{2R_T}, \quad (5)$$

где  $m_r$  – показатель адиабаты;  $R_r$  – универсальная газовая постоянная;  $T_r$  – абсолютная температура газа в трубопроводе;  $z_r$  – коэффициент сжимаемого газа;  $R_T$  – радиус трубы;  $\alpha_{m,n}$  – корни дисперсионного уравнения частот.

При акустическом резонансе  $f_a = f_n$  наступает антирезонанс упругих колебаний цилиндрической оболочки. В этом случае работа нагрузки (пульсаций давления) идет на поддержание акустических колебаний, а оболочка практически не колеблется. Однако, пульсирующие нагрузки с частотой  $f_a = f_n$  полностью проходят через оболочку и уравниваются акустическим давлением с ее внутренней стороны. При этом амплитуда виброскорости равна:

$$\dot{X} = \frac{A_1}{\gamma \sqrt{m_r R_r T_r z_r}}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – плотность газа.

Расчеты акустических колебаний газоперекачивающего агрегата ГПА-10 показывают, что при некоторых значениях температуры газа  $T_r$  в газопроводе возникает акустический резонанс ( $\alpha_{3,3}=3,61$  и  $\alpha_{1,4}=3,762$  [4]). Однако, максимальные амплитуды виброскорости (6) для наибольших пульсаций давления газа не превышают значений 2 мм/с. Если собственная частота упругоакустической системы отстроена от акустических резонансов, то выражение для амплитуды виброскорости трубной обвязки на лопаточных частотах  $f_n$  можно представить в следующем виде:

$$\dot{X} = \frac{r A_1}{\rho h \cdot 2\pi f_n \sqrt{\left( (1-r)^2 + \left( \frac{\delta}{\pi} \right)^2 r^2 \right)}}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность металла трубы;  $h$  – толщина трубы;  $r = z f_p / f_{m,n}$  – относительная собственная частота колебаний оболочки.

Особый интерес представляют резонансные колебания, когда  $r = 1$ :

$$\dot{X} = \frac{A_1}{\rho h \cdot 2\pi f_{m,n} \left( \frac{\delta}{\pi} \right)}. \quad (8)$$

Здесь собственные частоты определяются по следующей формуле [3]:

$$2\pi f_{m,n} = \sqrt{\left( \left( \frac{D}{\rho h} \right) \left( \frac{\pi^2 m^2}{l^2} + \frac{n^2}{R_T^2} \right)^2 + \left( 2\pi f_k \frac{\pi^2 m^2}{l^2 \left( \frac{\pi^2 m^2}{l^2} + \frac{n^2}{R_T^2} \right)} \right)^2 \right)}, \quad (9)$$

$m=1,2,\dots, n=2,3,\dots$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость трубы;

$l$  – расстояние между опорами трубы;

$f_k = \frac{c}{2\pi R_T}$  – кольцевая частота цилиндрической

оболочки;

$c = 5170$  м/с – скорость звука в материале тру-

бы.

Расчеты виброскорости трубной обвязки на первой лопаточной частоте ГПА-10 показывают, что при значении лопаточной частоты  $f_n = 1480$  Гц наблюдается острый резонанс  $r = 1$  с оболочечной частотой порядка  $m = 10$ ,  $n = 9$ , а кольцевая частота  $f_k = 1642$  Гц имеет незначительную отстройку от резонанса с лопаточной частотой. Максимальная амплитуда виброскорости (8) при  $\delta = 0,1$  и значениях потерь в колесе нагнетателя  $0,01 \div 0,1$  находится в пределах  $3,9 \div 39$  мм/с, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Расчет частоты предпомпажных колебаний показывает, что значение частоты соответствует 6,5 Гц с дальнейшим ее уменьшением до частоты 3 Гц при жестком помпаже.

Аналогично, в системе с электродвигателем [5] проявляется форма колебаний с частотой  $f_{12}$  (одна полуволна по дине оболочки;  $n = 2$ ), равная  $f_{12} = 264$  Гц.

Остальные собственные частоты  $f_{11} = 137$  Гц,  $f_{13} = 488$  Гц,  $f_{14} = 822$  Гц не оказывают влияния на общее значение виброскорости.

Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что колебательная система имеет источник, порождающий короткие импульсы возбуждения, и имеет резонанс на одной из собственных форм колебаний электродвигателя. Ударные импульсы проявляются в спектре модулированных колебаний в виде боковых полос частот, отстоящих на 25 Гц от несущей 265 Гц.

Для экспериментального исследования виброакустического сигнала корпуса ГТД использован ме-

тод спектрального анализа. Спектральный анализ проводился аппаратурой фирмы “Брюдь и Кьер” (Дания), в комплект которой входят: анализатор (спектрометр) 2034 и самописец 2307. При проведении измерений использовался акселерометр 4370 (437, 4369), закрепленный на штатном магните с кабелем длиной 50 м. Большая избирательная способность частотного анализатора 2034 позволила решить задачу выделения информативных спектральных составляющих.

Установлено, что высокочастотные лопаточные колебания с боковыми полосами частот проявляются на корпусе и обвязке нагнетателя.

Помпажные колебания модулируют амплитуду лопаточной частоты  $f_n = 1400$  Гц так, что в спектре присутствуют характерные боковые полосы частот, отстоящие на 6 Гц от несущей.

При жестком помпаже боковые полосы отстоят на 2 Гц, что согласуется с теоретическими и расчетными данными.

Для выделения помпажных колебаний из спектра вибросигнала использовано амплитудное детектирование на основе преобразования Гильберта. Амплитудное детектирование, также называемое «амплитудной модуляцией», построено на спектральном анализе огибающей вибросигнала, так как с помощью преобразования Гильберта амплитудную модуляцию можно вывести в спектр огибающей.

Общее выражение, определяющее преобразование Гильберта  $\chi$  временного  $x(t)$  и частотного  $X(f)$  вибросигналов, имеет вид:

$$\chi(x(t)) = \tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau; \quad (10)$$

$$\chi(X(f)) = \tilde{X}(f) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\Phi) \frac{1}{f - \Phi} d\Phi.$$

Известно [2], что преобразование Гильберта  $\tilde{x}(t)$  соответствует сдвигу по фазе на  $\pi/2$  временной функции  $x(t)$ . Полученное путем обратного преобразования Фурье спектра  $X(f)$ , преобразование является комплексным (аналитический сигнал) с действительной частью, являющейся преобразованием Гильберта мнимой части и наоборот. В связи с этим на практике для демодуляции сигнала применяют двукратное преобразование Гильберта аналитического сигнала [6].

Процедура демодуляции модулированного вибросигнала  $x(t)$  следующая: выполнение преобразования Гильберта  $\tilde{x}(t)$ ; создание аналитического сигнала  $x(t) + i\tilde{x}(t)$ ; разложение аналитического

сигнала на относящиеся к амплитудной и фазовой модуляции составляющие.

При этом процесс анализа амплитуды помпажных колебаний следующий: выделение диапазона частот в спектре, где происходит амплитудная и частотная модуляция (в нашем случае диапазон лопаточных частот); устранение всех компонент за пределами этой полосы частот; выпрямление оставшегося вибросигнала для сохранения только его огибающей, которое представляет следствие модуляции помпажными колебаниями лопаточной пульсации; повторный анализ в диапазоне низких частот для определения модулирующей частоты.

Например, в электродвигателе [5] в процессе развития дефекта амплитуда вибрации становится модулированной в силу периодических изменений ударных воздействий. Это может быть вызвано повторяющейся ударной силой из-за местных повреждений поверхности.

При этом появляется амплитудная модуляция структурного резонанса, вызываемого повторяющейся периодической динамической нагрузкой при наличии локальных повреждений, как например, в случае появления трещин.

Амплитудную модуляцию, возникающую из-за модулирующих усилий (геометрический сдвиг) и возрастания случайных усилий, вызываемых изменениями силы трения, можно вывести в спектр огибающей.

При этом анализ амплитуды производят в высокочастотном структурном резонансе. В нашем случае для частоты  $f_{12} = 265$  Гц. Такой подход основан на убеждении, что только локализованные неисправности электродвигателя представляют интерес, поэтому анализ амплитуды проводится в высокочастотном структурном резонансе.

При выборе высокочастотного резонанса становится проще избежать помех от других источников вибрации (к примеру, зацеплений зубчатых колес, прохождений лопатки, вентиляторов, сил электрического взаимодействия и проч.) и их модулирующего воздействия.

Основанный на оценке амплитудной модуляции случайной вибрации и структурного резонанса, анализ амплитуды является эффективным методом определения, диагностики и оценки вибросостояния электродвигателя.

Спектральный анализ огибающей структурного резонанса 265 Гц позволил выделить амплитуды и частоты ударных импульсов, подчиняющиеся закону распределения амплитуд [5].

## Выводы и перспективы дальнейших исследований

Приведено сравнение узкополосного низкочастотного спектра и спектра огибающей модулированного сигнала. Низкочастотный спектр виброскорости корпуса подшипника ГТД не показывает признаков помпажа, которые имеются в модулированном сигнале. В амплитудном спектре огибающей этого же сигнала четко выделены пики помпажных колебаний.

Основанный на оценке амплитудной модуляции лопаточной вибрации, анализ боковых полос частот является эффективным методом определения, диагностики и оценки помпажных пульсаций. Кроме того, анализ амплитуды имеет более широкую сферу применения при учете того, что его основное преимущество заключается в «сдвиге» высокочастотной модуляции в низкочастотный диапазон. Это к тому же устраняет необходимость в крайне высокой разрешающей способности, которая часто несовместима с недостаточно устойчивой частотой вращения ротора ГТД при помпаже.

## Литература

1. Игуменцев Е.А. Демодуляция помпажных колебаний нагнетателя с помощью спектрального анализа огибающей лопаточной вибрации / Е.А. Игуменцев, В.О. Таргонский // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2001. – № 4. – С. 34-40.
2. Игуменцев Е.А. Низкочастотные помпажные колебания нагнетателя / Е.А. Игуменцев, Е.А. Прокопенко // *Вестник ХГПУ "Проблемы автоматизированного электропривода"*. – Х.: ХГПУ, 2005. – С. 203-205.
3. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в вентиляторах и компрессорах / В.В. Казакевич. – М.: Машиз, 1959. – 191 с.
4. Игуменцев Е.А. Исследование причин высокочастотной вибрации трубопроводов нагнетателей природного газа / Е.А. Игуменцев // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 1997. – № 1. – С. 34-40.
5. Кузнецов Б.И. Демодуляция ударных импульсов вибрации электродвигателя с помощью спектрального анализа огибающей / Б.И. Кузнецов, Е.А. Игуменцев, С.В. Гетьманенко // *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия «Электротехника, электроника и электропривод»*. – Х.: ХДПУ, 2001. – Вып. 10. – С. 140-143.

6. Йолль Коурен. Анализ огибающей для эффективного обнаружения неисправностей подшипников / Йолль Коурен // Международный информа-

ционной бюллетень, публикуемый специалистами по мониторингу. – 2000. – № 1. – С. 14-17.

Поступила в редакцию 15.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры систем управления технологическими процессами и объектами Б.И. Кузнецов, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### ДЕМОДУЛЯЦІЯ ПОМПАЖНИХ КОЛИВАНЬ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

*Е.О. Ігуменцев, О.О. Прокопенко*

У роботі розглянуті коливання тиску газу, які збуджують вібрацію корпусів нагнітача. Наведене порівняння вузькосмужного низькочастотного спектра й спектра, що обгинає модульованого сигналу нагнітача й електродвигуна. В амплітудному спектрі, що обгинає виділені піки помпажних коливань. Аналіз бічних смуг спектра вібрації використаний для діагностики помпажних коливань. У спектрі вібрації електродвигуна виділені частотні складові, характеризують ударні імпульси, що дозволяють виявити дефекти підшипників. Ударні імпульси в спектрі проявляються у вигляді бічних смуг частот. Демодуляція виконана за допомогою перетворення Гільберта.

**Ключові слова:** нагнітач, спектр, вібрація, коливання, газотурбінний двигун, модуляція, діагностика.

### DEMODULATION OF POMPAZ FLUCTUATIONS OF GAS-TURBINE ENGINE

*E.A. Igumentsev, E.A. Prokopenko*

In work fluctuations of pressure of gas which raise vibration of cases nagneta-telja are considered. Comparison of a narrow-band low-frequency spectrum and a spectrum bending around the modulated signal of a supercharger and the electric motor is resulted. In a peak spectrum bending around peaks pompazhnykh fluctuations are allocated. The analysis of lateral strips of a spectrum of vibration is used for diagnostics pompazhnykh fluctuations. In a spectrum of vibration of the electric motor the frequency components characterizing shock impulses are allocated, allowing to find out defects of bearings. Shock impulses in a spectrum are shown in the form of lateral strips of frequencies. Demodulation is executed by means of Hilbert's transformation.

**Key words:** supercharger, spectrum, vibration, fluctuations, gas-turbine engine, modulation, diagnostics.

**Ігуменцев Євгеній Александрович** – д-р техн. наук, доцент, заведуючий кафедри систем управління технологічними процесами і об'єктами Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна, e-mail: digaz@list.ru.

**Прокопенко Елена Александровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент систем управління технологічними процесами і об'єктами Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна, e-mail: lenjusja@pochta.ru.

УДК 621.515

**В.П. ПАРАФЕЙНИК<sup>1</sup>, А.Н. НЕФЕДОВ<sup>1</sup>, И.Н. ТЕРТЫШНЫЙ<sup>2</sup>, В.Н. ЧОБЕНКО<sup>3</sup>,  
А.Л. ЛЮТИКОВ<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*СКБ турбокомпрессорных машин ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», Украина*<sup>2</sup>*Сумской государственный университет, Украина*<sup>3</sup>*ГП Научно-производственный комплекс газотурбостроения  
«Зоря»-«Машипроект», Николаев, Украина*

## **ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГПА С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ СУДОВОГО ТИПА**

*Приведены результаты анализа эффективности газоперекачивающего агрегата типа ГПА-Ц-16С мощностью 16МВт на конечное давление 12,0 МПа, который комплектуется центробежными компрессорами различного типа. Отмечено, что в случае использования привода простого рабочего цикла эффективность агрегата может определяться как произведение эффективного КПД привода на политропный КПД компрессора. Получены количественные данные о влиянии КПД компрессора на величину КПД агрегата и расхода топливного газа при различных режимах эксплуатации, а также о возможности выявления режимов его работы с максимальным значением КПД (оптимальный режим) для некоторых типов проточных частей компрессора.*

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат; центробежный компрессор; газотурбинный привод; эффективность; режим работы.

### **Введение**

Одним из важнейших вопросов методологии проектирования газоперекачивающих (турбокомпрессорных) агрегатов (наиболее общим является термин турбокомпрессорный агрегат (ТКА), применяемый в нефтяной промышленности; в газовой промышленности используется термин газоперекачивающий агрегат) на предпроектной стадии работ является выбор варианта компоновочной схемы газоперекачивающего агрегата (ГПА), основой которого являются газотурбинный двигатель (ГТД) в составе газотурбинного привода агрегата и центробежный компрессор (ЦК), обеспечивающий повышение давления газа для его транспорта, обратной закачки в пласт или подземное хранилище.

Для сравнительного анализа различных конструктивных вариантов ГПА целесообразно использовать КПД агрегата, учитывающий особенности рабочего процесса, принципиальные конструктивные решения по компоновке агрегата, а также эффективность как ГТД, так и ЦК при его работе «на магистраль».

На сегодняшний день в типовых технических требованиях отсутствует понятие КПД ГПА, энергетическая эффективность которого оценивается двумя показателями: эффективным КПД двигателя в составе агрегата (компрессорной станции) и политропным КПД компрессора [1]. Это удовлетворяет

эксплуатационников оборудования, но при сравнительном анализе конструктивных вариантов агрегатов, установок или компрессорных станций (КС), создаваемых на основе установок различного типа, необходимо оперировать понятием КПД агрегата или установки в целом.

Впервые понятие КПД агрегата с целью анализа энергетической эффективности газохолодильного перекачивающего агрегата в форме эксергетического КПД было представлено в работе [2]. Применительно к блочно-комплектному компрессорному оборудованию, создаваемого на основе многокаскадных (многокорпусных) ЦК, эксергетический анализ рабочего процесса турбокомпрессорных установок газовой и нефтяной промышленности с использованием эксергетического КПД в качестве критерия эффективности, впервые выполнен в работе [3].

Однако в случае ГПА с ГТД простого рабочего цикла, однокорпусным ЦК, без учета затрат электроэнергии и при отсутствии утилизации теплоты выхлопных газов, с целью выработки пара, горячей воды, холода или электроэнергии целесообразно использовать КПД агрегата в более простой форме. В частности, в работах [4, 5] для анализа эффективности ГПА для линейных компрессорных станций (КС) газовой промышленности использовался КПД ГПА в форме:

$$\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}} = \eta_e \cdot \eta_{\text{П}}, \quad (1)$$

где  $\eta_e$  – эффективный КПД привода в составе агрегата или КС;  $\eta_{II}$  – политропный КПД ЦК.

Как известно [3, 5], показатель эффективности ГПА в таком виде не соответствует основам термодинамического анализа и является в значительной степени условным. Это связано с тем, что он принят без учета особенностей рабочих процессов ЦК и ГТД и в этом смысле не имеет корректного обоснования.

Однако с его использованием можно анализировать эффективность ГПА создаваемых, например, на базе ГТД и различных модификаций ЦК с одинаковыми конечными параметрами.

### Результаты исследований

В настоящей работе на примере анализа эффективности агрегата типа ГПА-Ц-16С с двигателем

типа ДГ90 мощностью 16МВт производства ГП НПКГ«Зоря»-«Машпроект» (г.Николаев) и различного типа ЦК конструкции ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», политропный КПД которых изменяется в диапазоне  $0,78 \div 0,86$ , изложены методические подходы к анализу эффективности ГПА, создаваемого на основе ГТД и ЦК с проточными частями (ПЧ), имеющих лопаточные (ЛД) и безлопаточные диффузоры (БЛД) в ступенях компрессора.

Таким образом, анализ влияния характеристик ЦК на эффективность ГПА осуществляется с использованием компрессоров 4<sup>х</sup> модификаций, основные геометрические характеристики которых представлены в табл. 1, а режимы работы в табл. 2.

Как видно из представленных данных, применение более нагруженных ступеней ЦК за счет увеличения  $\beta_{L2}$  и числа  $M_{u2}$  в ЦК-3 и ЦК-4 позволило сократить количество ступеней до трех (табл. 1).

Таблица 1

Основные геометрические характеристики ЦК мощностью 16 МВт

| Модификации ЦК                | ЦК-1            | ЦК-2                    | ЦК-3           | ЦК-4              |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------|
| Геометрические характеристики |                 |                         |                |                   |
| Тип ПЧ с ступеней             | БЛД             | БЛД                     | ЛД             | БЛД               |
| Количество ступеней           | 4               | 4                       | 3              | 3                 |
| $D_2$ , мм                    | 705             | 705                     | 750            | 750               |
| $Z_{1-2}$                     | 11/11/11/11     | 13/13/11/11             | 18/18/18       | 17/17/15          |
| $v_2$ , мм                    | 42,2            | 38,4                    | 35,2           | 32,2              |
| $\beta_{L2}$ , град           | 32/32/31,5/31,5 | 35,83/35,83/31,87/31,87 | 52,1/52,1/52,1 | 48,31/48,31/44,52 |
| $Z_{3-4}$                     | –               | –                       | 20/20/20       | –                 |
| $D_4$ , мм                    | 1208            | 1164                    | 1162           | 1237              |

Таблица 2

Режимы работы исследуемых ЦК при расчетном значении мощности и частоты вращения ротора ( $n = 5100$  об/мин)

| Модификация ЦК | $N_p$ , МВт | $\eta_{II}$ | $k$   | $R$ , Дж/кг·К | $U_2$ , м/с | $M_{u2}^*$ | $Re_{u2}^*$       |
|----------------|-------------|-------------|-------|---------------|-------------|------------|-------------------|
| ЦК-1           | 15,2        | 0,86        | 1,409 | 503,66        | 188,3       | 0,45       | $7,02 \cdot 10^8$ |
| ЦК-2           | 15,2        | 0,83        | 1,409 | 503,66        | 188,0       | 0,45       | $7,02 \cdot 10^8$ |
| ЦК-3           | 15,2        | 0,81        | 1,409 | 503,66        | 200,0       | 0,48       | $7,94 \cdot 10^8$ |
| ЦК-4           | 15,2        | 0,78        | 1,409 | 503,66        | 200,0       | 0,48       | $7,94 \cdot 10^8$ |

Примечание\*. Значение чисел  $M_{u2}$  и  $Re_{u2}$  приведены по условиям на входе в ПЧ.

Однако КПД этих ПЧ на расчетном режиме существенно ниже по сравнению с модификациями ЦК-1 и ЦК-2 (табл. 2). Следует отметить, что ПЧ анализируемых ЦК были спроектированы с использованием безразмерных характеристик ступеней реальных компрессоров ( $\eta_{II}, \pi_K = f(\Phi_0)$ ), где  $\Phi_0$  – условный коэффициент расхода), на основе которых ранее в ОАО были созданы агрегаты на давление 7,45 МПа мощностью  $6,3 \div 16$  МВт. Проектирование

ГПА для линейных КС на  $P_K = 12,0$  МПа целесообразно при мощности привода  $25 \div 32$  МВт. Однако целью данной работы является выявление методических особенностей, связанных с анализом влияния характеристик ЦК на эффективность ГПА при различных режимах их эксплуатации. В связи с этим мощностные характеристики агрегата не имеют принципиального значения при условии, что анализ осуществляется при критериях динамического по-

добия ( $M$  и  $R_c$ ), соответствующих режимам автономности при работе ЦК. Как видно из данных табл. 2, это условие для анализируемых ЦК соблюдается ( $M_{u2} < 0,6$ , а  $R_{cu2} > 2 \cdot 10^6$ ).

При анализе влияния характеристик ЦК на работу ГПА используются безразмерные и размерные газодинамические характеристики компрессоров. На рис. 1 представлены размерные характеристики ПЧ модификации ЦК-3, имеющей политропный КПД на расчетном режиме 0,81 (табл. 2).

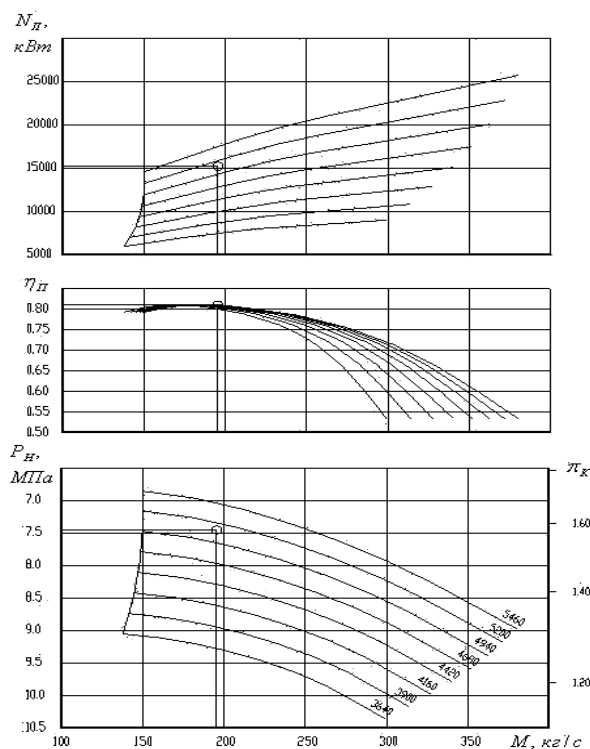


Рис. 1. Размерные газодинамические характеристики проточной части ЦК-3 ( $P_k=11,77$  МПа,  $T_n=289,0$  К,  $R=503,7$  Дж/(кг·К))

Анализ влияния политропного КПД ЦК на эффективность ГПА осуществляется при значении

частоты вращения роторной системы (силовая турбина и ЦК) в диапазоне  $n = (0,75 \div 1,05)n_n$ . При этом номинальное значение частоты вращения составляет  $n = 5200$  об/мин.

Как известно, в качестве режимного параметра при анализе характеристик ступеней ЦК чаще всего используется объемная производительность по условиям на всасывании ( $V$ ) или эквивалентный ей условный коэффициент ( $\Phi$ ). В настоящей работе в связи с тем, что анализ эффективности ГПА осуществляется на основе Первого закона термодинамики в качестве режимного параметра использовалась массовая производительность ЦК (рис. 1), которая по отношению к ГТД является аналогом мощности газотурбинного привода.

Кроме уровня политропного КПД, важное значение имеет пологость характеристики  $\eta_{\Pi} = f(\Phi)$ . Для ее оценки используется показатель зоны экономичной работы ( $\Phi''/\Phi'$ ), определяющий зону характеристики по КПД со значением  $0,9(\eta_{\Pi})_{\max}$ . Для оценки удаленности реального режима работы от зоны помпажа используется коэффициент сближения оптимального и помпажного режимов ( $K_1 = \Phi_{\text{помп}} / \Phi_{\text{опт}}$ ) или коэффициент запаса по помпажу  $K_2 = 1 - \Phi_{\text{помп}} / \Phi_{\text{опт}}$ , выражаемый в процентах [6]. Основные показатели эффективности ПЧ исследуемых ЦК, представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ полученных результатов показал преимущество 4х-ступенчатой ПЧ с БЛД (ЦК-1), так как на расчетном режиме она обеспечивает наибольший  $K_1 = 0,86$ ; ширину зоны экономичной работы  $\Phi''/\Phi' = 2,14$ , а также коэффициент запаса по помпажу  $K_2 = 63$  %, что является максимальным среди анализируемых ПЧ. С ее использованием был создан ЦК мощностью 16МВт для агрегата типа ГПА-Ц-16П (КС «Сивас», Турецкая Республика).

Таблица 3

Показатели эффективности проточных частей исследуемых компрессоров

| Модификации ЦК | Показатели |          |       |              |                |           |
|----------------|------------|----------|-------|--------------|----------------|-----------|
|                | $M$ , кг/с | $\Phi_0$ | $K_1$ | $\Psi_{\Pi}$ | $\Phi''/\Phi'$ | $K_2$ , % |
| ЦК-1           | 207,7      | 0,0473   | 0,86  | 1,7404       | 2,14           | 54        |
| ЦК-2           | 200,0      | 0,0455   | 0,83  | 1,744        | 1,66           | 38        |
| ЦК-3           | 194,8      | 0,0368   | 0,81  | 1,544        | 1,65           | 21        |
| ЦК-4           | 187,1      | 0,0354   | 0,78  | 1,548        | 1,43           | 24        |

Самой низкоэффективной является ПЧ для ЦК-4, имеющая на расчетном режиме при значении  $\Phi_0 \approx 0,035$   $K_1 = 0,78$ , ширину зоны экономичной работы  $\Phi''/\Phi' = 1,43$  и коэффициент политропного напора  $\Psi_{\Pi} = 1,548$ , что выше его значения для ПЧ ЦК-3 (табл. 3). В тоже время с использованием без-

размерных характеристик ПЧ компрессора ЦК-3 в различные периоды также создавались реальные ЦК. Например, компрессор 294ГЦ2-370/25-56М1 для агрегатов типа ГПА-Ц-16 с ГТД НК-16-18СТ (КС «Ахангаран», АК «Узбектрансгаз»).

Все указанные ПЧ, выбранные для ЦК – 1, 2, 3, 4 с целью анализа влияния характеристик ЦК на эф-

фективность ГПА, разрабатывались в различные периоды и подтверждают как общие тенденции в развитии газовых ЦК на повышение их эффективности, так и необходимость углубленного расчетного и экспериментального исследования ПЧ с целью дальнейшего повышения их эффективности. Применение указанных типов компрессоров в составе конкретных образцов ГПА, во многом обусловлено производственной ситуацией, складывающейся как на заводе – изготовителе оборудования, так и на вновь сооружаемых или реконструируемых КС магистральных газопроводов и других объектах заказчика.

Мощностные характеристики модификаций ЦК, имеющих ПЧ с безлопаточными (ЦК-1) и лопаточными (ЦК-3) диффузорами ступеней представлены на рис. 2.

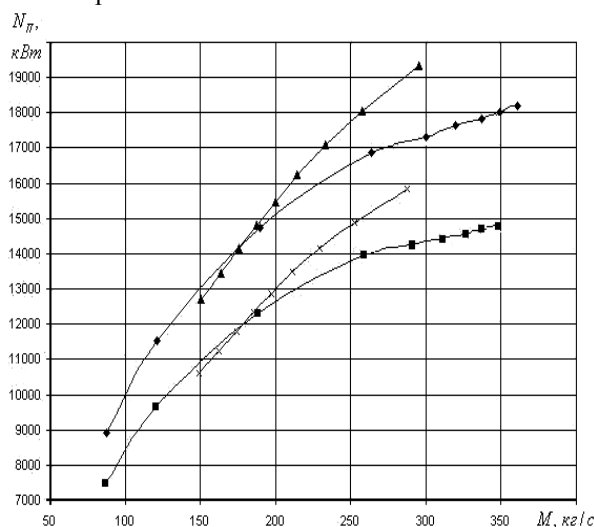


Рис. 2. Зависимость мощности, потребляемой ЦК от производительности: —◆— ЦК-1 ( $n=5100$  об/мин); —■— ЦК-1 ( $n=4680$  об/мин); —■— ЦК-3 ( $n=5100$  об/мин); —×— ЦК-3 ( $n=4680$  об/мин)

Как видно из рисунка, при снижении производительности ЦК мощность, потребляемая ПЧ с ЛД, снижается более резко по сравнению с ПЧ, созданной на основе ступеней с БЛД, что соответствует известным физическим особенностям рабочего процесса ступеней ЦК с ЛД и БЛД. Следует также отметить, что при проектировании реальных ПЧ для компрессоров агрегатов необходимо учитывать ограничение мощности двигателя (16 МВт при  $T_0 = 288$  К). В связи с этим дальнейший анализ эффективности ГПА с ЦК различного типа будем проводить с использованием характеристик компрессоров и двигателя, полученных на частоте вращения ротора  $n = 4680$  об/мин, так как при таком режиме работы двигатель будет располагать необходимым запасом мощности.

Зависимости, иллюстрирующие эффективность исследуемых ЦК в составе агрегата ГПА-Ц-16С/120-

1,6 в виде характеристик  $\eta_{\Pi} = f(N_{\Pi})$ , представлены на рис. 3. Там же указаны границы помпажа для каждой из анализируемых характеристик, расположение которых соответствует данным табл. 3.

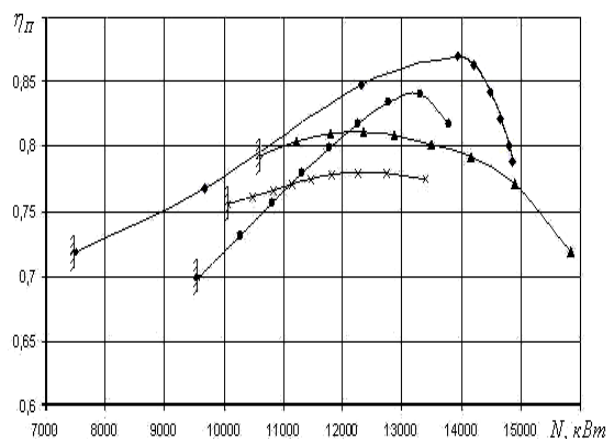


Рис. 3. Зависимость эффективности исследуемых ЦК в составе агрегата ГПА-Ц-16С/120-1,6 мощностью 16 МВт ( $n=4680$  об/мин): —◆— ЦК-1; —■— ЦК-2; —■— ЦК-3; —×— ЦК-4; —◆— граница помпажа

Характеристики ЦК на рис. 3 построены на основе экспериментальных данных, полученным в процессе испытаний ЦК, проточные части которых создавались с использованием соответствующих безразмерных характеристик. В связи с этим они представлены с определенными ограничениями по мощностному диапазону. Однако, как будет показано ниже, это не препятствует проведению требуемого анализа. При сравнительном анализе характеристик ЦК необходимо отметить, что ЦК-3 при работе на нерасчетных режимах с уменьшением производительности по эффективности приближается к ЦК-1 и превышает уровень КПД ЦК-2 при мощности менее 11,0 МВт (рис. 4).

Эффективность ЦК-4 также заметно превышает уровень КПД ЦК-2 при мощности 10 МВт. Следует иметь в виду, что такие режимы работы ЦК вполне реальны в составе даже линейных КС при их эксплуатации в летний период года.

Для оценки эффективности ГПА во всем диапазоне режимов его работы с использованием вышеприведенной зависимости (1) использовалась характеристика  $\eta_e = f(N_{СТ})$ , представленная на рис. 5.

Как видно из рисунка, при анализируемом режиме работы ЦК-1 и ЦК-3 по частоте вращения ротора величина  $\eta_e$  привода изменяется в диапазоне  $0,27 \div 0,332$ . Последнее значение соответствует эффективному КПД на расчетном режиме при мощности, близкой 16 МВт.

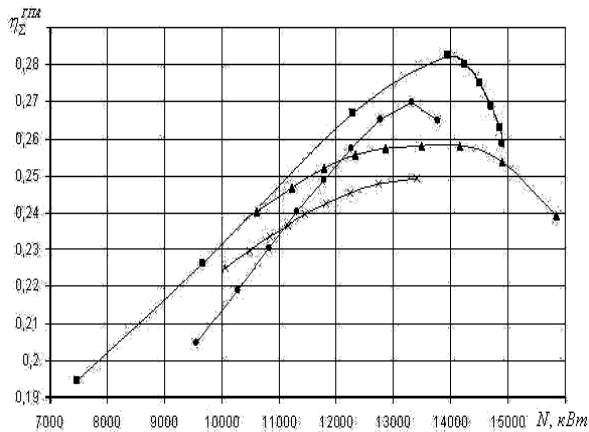


Рис. 4. Сравнительный анализ эффективности ГПА по величине интегрального КПД ( $n=4680$  об/мин): —■— ЦК-1; —●— ЦК-2; —▲— ЦК-3; —×— ЦК-4

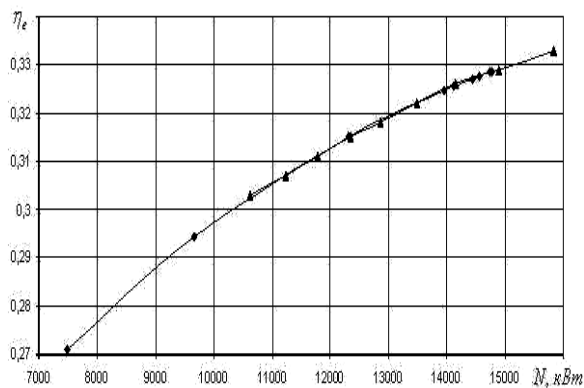


Рис. 5. Зависимость КПД газотурбинного привода от мощности ( $n=4680$  об/мин): —■— ЦК-1; —▲— ЦК-3

С использованием полученных данных об эффективности ЦК и ГТД был выполнен расчетный анализ эффективности ГПА по величине  $\eta_{\Sigma}^{ГПА}$ . Некоторые результаты этого анализа для случая  $n = 4680$  об/мин и представлены на рис. 4.

Из анализа полученных данных следует:

1. Уровень КПД ГПА определяется в первую очередь эффективностью ГТП. Для анализируемого агрегата величина  $(\eta_{\Sigma}^{ГПА})_{\max}$  изменяется в диапазоне от  $0,281 \div 0,293$  для  $n_{СТ} = 4680 \div 5100$  об/мин, соответственно (величина  $\eta_e = 0,335$  при  $N = 16$  МВт и  $n_{СТ} = 5100 \div 5200$  об/мин). Подключение ЦК для работы в составе агрегата «снижает» КПД ГТП пропорционально величине политропного КПД в области номинальных (проектных) режимов компрессора.

2. Характер зависимости  $\eta_{\Sigma}^{ГПА} = f(N_{ЦК,СТ})$ , особенно в области нерасчетных режимов, определяется формой газодинамических характеристик ЦК. При этом, как будет показано ниже, существенное влияние на положение оптимума кривой

$\eta_{\Sigma}^{ГПА} = f(N)$  оказывает форма характеристики компрессора, определяемая конструктивными особенностями отдельных ступеней, в частности, существенное влияние оказывает конструкция диффузоров в ступенях ЦК.

3. Влияние газодинамических характеристик ЦК в нерасчетной области по величине массовых расходов выявляется при использовании не только характеристики КПД, но и других показателей эффективности ПЧ: пологости характеристики, коэффициента запаса по помпажу и т.д. В целом, как видно из сопоставления рис. 3 и 5, характер изменения  $\eta_{\Sigma}^{ГПА}$  на нерасчетных режимах соответствует характеристике  $\eta_{П} = f(N)$  при тех же режимах работы. Как показали результаты анализа, в случае ГПА с ЦК-1, имеющего ПЧ с БЛД ступеней сжатия, режимы, соответствующие  $(\eta_{П})_{\max}$  и  $(\eta_{\Sigma}^{ГПА})_{\max}$ , совпадают по значениям массовой производительности и, соответственно, по потребляемой мощности. Для случая ГПА с ЦК-3 (ступени сжатия ПЧ с ЛД) совпадение проектного режима ЦК и оптимального режима ГПА не наблюдается.

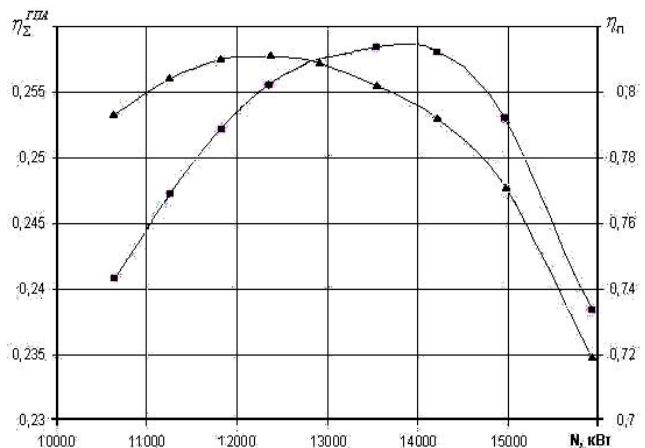


Рис. 6. Зависимость КПД компрессора ЦК-3 и ГПА, оснащенного таким компрессором, от мощности ( $n=4680$  об/мин): —■— интегральный КПД ГПА; —▲— КПД ЦК-3

На рис. 6 представлены результаты сравнительного анализа характера изменения  $\eta_{\Sigma}^{ГПА}$  и  $\eta_{П}^{ЦК}$  для случая применения ЦК-3 при  $n_{СТ} = 4680$  об/мин. Как видно, оптимальный режим работы ГПА по величине  $(\eta_{\Sigma}^{ГПА})_{\max} \approx 0,26$  достигается при  $N = 13,5 \div 14,0$  МВт в то время как проектный режим по ЦК  $(\eta_{П})_{\max} \approx 0,81$  соответствует мощности  $12,0 \div 12,5$  МВт. Этот результат совпадает с ранее полученными данными об эффективности ГПА типа

ГПА-Ц-6,3А, ГПА-Ц-16 и ГПА-Ц-25, оснащенных ступенями сжатия с ЛД [3].

Выше в табл. 3 отмечалось, что зона экономичной работы (коэффициент полостности) для ЦК-1 составляет 2,14, а для ЦК-3 1,65, т.е. ЦК-3 имеет более крутую характеристику  $\eta_{\Pi} = f(N)$ . В связи с этим при удалении режима его работы от точки, соответствующей режиму с  $(\eta_{\Pi})_{\max}$ , наблюдается падение величины  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}}$ , обусловленное уменьшением  $\eta_{\Pi}$  при повышении производительности ЦК после достижения оптимального значения мощности 14МВт.

Таким образом, для достижения оптимальных режимов работы ГПА по величине  $(\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}})_{\max}$  требуется определенный запас мощности ГТД. В связи с этим требуется анализ режимов работы ЦК по мощности и частоте вращения ротора во всем диапазоне значений.

Интегральные зависимости, характеризующие влияние работы ЦК на эффективность ГПА, представлены на рис. 7.

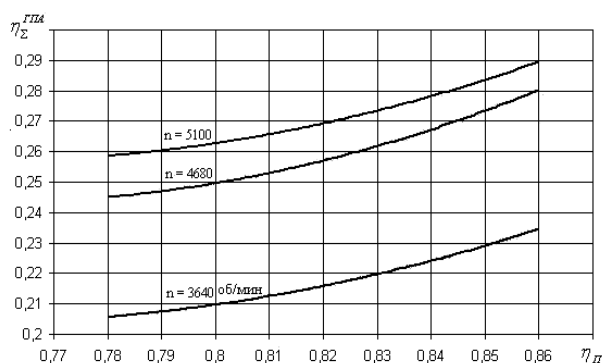


Рис. 7. Изменение величины КПД газоперекачивающего агрегата в зависимости от эффективности ЦК

По оси абсцисс на этом рисунке отложены значения  $(\eta_{\Pi}^{\text{ЦК}})_{\max}$ , т.е. КПД ЦК на проектных режимах для диапазона частот вращения  $n=3640\div 5100$  об/мин. Полученные зависимости позволяют оценивать эффективность ГПА, оснащенного ЦК различного типа, при изменении их  $(\eta_{\Pi}^{\text{ЦК}})_{\max}$  в диапазоне  $0,78\div 0,86$  при условии, что числа  $M_u$  и  $Re_u$  при работе компрессоров соответствует режимам автоточности.

К показателям эффективности агрегата относятся также расход топливного газа, изменение величины которого при его работе с компрессорами типа ЦК-1, 2, 3, 4 представлено на рис. 8.

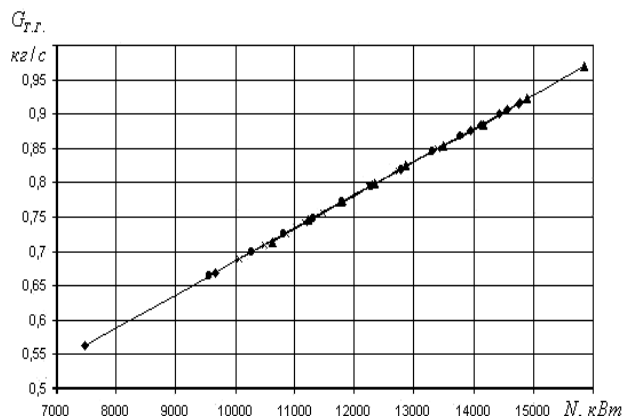


Рис. 8. Расход топливного газа в ГТД при работе ГПА с ЦК различного типа ( $n=4680$  об/мин):  
—●— ЦК-1; —■— ЦК-2; —▲— ЦК-3, —×— ЦК-4

Как видно из рисунка, расход топливного газа в двигателе ДГ90Л2 на режиме по частоте вращения  $n = 4680$  об/мин при использовании ЦК различного типа изменяется в диапазоне  $0,56\div 0,94$  кг/с, что соответствует техническим условиям на поставку двигателей [7].

Представляют интерес данные о соотношении затрат топлива и количества транспортируемого газа, который можно рассматривать, как более общий показатель эффективности ГПА при его эксплуатации. В связи с этим на рис. 9 приведены данные об изменении относительного расхода топлива  $\bar{G}_{\text{Т.Г.}} = \frac{G_{\text{Т.Г.}}}{G_{\Gamma}}$  ( $G_{\text{Т.Г.}}$  — массовый расход топливного газа, кг/с;  $G_{\Gamma}$  — массовая производительность ГПА (ЦК), кг/с) при использовании ЦК различного типа в составе агрегата ГПА-Ц-16С/120-1,6.

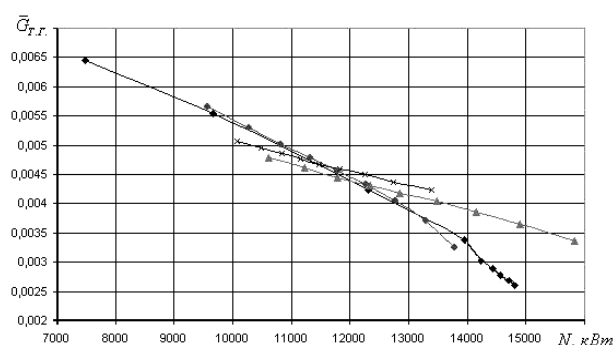


Рис. 9. Изменение относительного расхода топлива ( $\bar{G}_{\text{Т.Г.}}$ ) на транспорт газа при использовании ЦК различного типа ( $n=4680$  об/мин):  
—●— ЦК-1; —■— ЦК-2; —▲— ЦК-3, —×— ЦК-4

Как видно, из рисунка, характер изменения величины  $\bar{G}_{\text{Т.Г.}}$  соответствует характеру изменения  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}}$  (рис. 4) и особенностям изменения зависи-

мостей  $\eta_{\Pi} = f(N)$  для анализируемых режимов работы ЦК (рис. 3).

Наиболее универсальным показателем энергетической эффективности газотурбинных ГПА, по-видимому, может быть соотношение затрат энергии, полезно использованной при их эксплуатации, к суммарной энергии сжатого газа. Такой показатель позволяет учесть не только конструктивное совершенство ГПА, но и энергетические характеристики газообразного топлива и компримируемых углеводородов.

При анализе характеристик ТКА следует также учитывать энергетические характеристики конденсата, производимого в процессе компримирования нефтяного газа.

### Выводы

Выполненная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Энергетическая эффективность газотурбинного агрегата определяется уровнем эффективности ГТД и ЦК, на основе которых создается турбоблок ГПА.

2. Обобщенным показателем энергетической эффективности ГПА является его КПД ( $\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}}$ ), который в зависимости от решаемой задачи, особенностей рабочего процесса и энерготехнологической схемы агрегата может быть получен с использованием Первого и Второго законов термодинамики. В случае создания ГПА на основе ГТД простого и регенеративного циклов, без учета затрат электроэнергии, а также при отсутствии утилизации теплоты выхлопных газов в качестве КПД агрегата может быть использована известная зависимость, представляющая собой произведение эффективного КПД газотурбинного привода на политропный КПД ЦК.

3. Уровень энергетической эффективности ГПА, предопределяющий величину затрат топлива на компримирование газа, зависит от эффективности привода. Характер изменения величины  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}} = f(N_{\text{СТ,ЦК}})$  определяется характером изменения зависимости  $\eta_{\Pi}^{\text{ЦК}} = f(N_{\text{ЦК}})$ .

При этом тип проточной части ЦК и ее геометрические характеристики оказывают существенное влияние на изменение эффективности ГПА как на расчетных так и на нерасчетных режимах.

4. При изменении политропного КПД ЦК агрегата ГПА-Ц-16С/120-1,6, создаваемых на основе ПЧ различного типа, при значении  $\eta_{\Pi} = 0,78 \div 0,86$  эффективность ГПА изменяется в диапазоне

$\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}} = 0,26 \div 0,29$  (при  $\eta_e = 0,283 \div 0,335$  для всего диапазона мощности ГТД).

5. Конструкция проточной части ЦК, в частности, тип применяемых диффузоров оказывает существенное влияние на уровень КПД ЦК как на расчетных так и на нерасчетных режимах. В связи с этим на расчетном режиме КПД ГПА по сравнению с КПД ГТД на муфте двигателя изменяется пропорционально изменению политропного КПД ЦК. На нерасчетных режимах работы ЦК следует учитывать изменение КПД ГПА в соответствии с изменением характеристики компрессора по величине политропного КПД вплоть до границы помпажа.

6. Кроме уровня политропного КПД ЦК существенное влияние на характер изменения КПД ГПА оказывает ширина зоны экономичной работы (крутизна характеристики по КПД) ЦК. Для проточной части компрессоров типа ЦК-1, имеющей весьма пологую характеристику (показатель зоны экономичной работы составляет 2,14), обеспечивается совпадение проектного режима работы компрессора по мощности (при максимальном  $\eta_{\Pi}$ ) и оптимального значения КПД ГПА когда  $\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}}$  достигает максимального значения. Для проточной части компрессора типа ЦК-3 со ступенями сжатия, имеющими ЛД и показатель зоны экономичной работы 1,65, наблюдается существенное расхождение мощности ГПА на проектном и оптимальном режимах, достигающее для ЦК-1 свыше 10%.

7. Для достижения оптимального режима работы ГПА, т.е. режима  $(\eta_{\Sigma}^{\text{ГПА}})_{\text{max}}$ , в зависимости от геометрии проточной части ЦК требуется определенный запас мощности приводного ГТП.

8. Максимальная энергетическая эффективность ГПА может быть достигнута при тщательном согласовании характеристик ЦК и ГТП. В связи с этим на предпроектной стадии работ по созданию ГПА, при разработке ТЗ на ГТД и ЦК необходимо стремиться не только к максимальному повышению эффективности каждого из этих элементов, но и выбору наиболее целесообразного режима их совместной работы в составе агрегата.

### Литература

1. Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам / СТО Газпром 2-3.5-138-2007 // ООО «ВНИИгаз». ОАО «Газпром». – М., 2007. – 63 с.
2. Повышение эффективности использования газа на компрессорных станциях / В.А. Динков, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, П.М. Мужиливский. – М.: Недра, 1981. – 296 с.

3. Парафейник В.П. Научные основы совершенствования турбокомпрессорных установок с газотурбинным приводом: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.16 / В.П. Парафейник. – Х.: ИПМаш им. А.Н. Подгорного, 2009. – 41 с.

4. Соколов С.Г. Газоперекачивающие агрегаты с авиаприводом и способы повышения их эффективности. дисс... канд. техн. наук: 05.04.06 / С.Г. Соколов. – М.: МИХМ, 1984. – 130 с.

5. Согласование характеристик системы ГТД-ЦК и анализ эффективности газоперекачивающего

агрегата / В.В. Романов, Ю.С. Бухолдин, В.П. Парафейник, В.Е. Спицын, В.Н. Чобенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3 (45). – С. 15-20.

6. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис. – Л.: Машиностроение, 1981. – 351 с.

7. Двигатели газотурбинные ДГ90. Технические условия (ТУ У19.1 – 31821381-018:2009). – Николаев: «Зоря»-«Машпроект», 2009. – 43 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, с.н.с. доцент кафедры аэрокосмической теплотехники И.И. Петухов, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков.

### ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГПА З ГАЗОТУРБІННИМ ПРИВОДОМ СУДНОВОГО ТИПУ

**В.П. Парафійник, О.М. Нефьодов, І.М. Тертишний, В.М. Чобенко, О.Л. Лютиков**

Наведені результати аналізу ефективності газоперекачувального агрегату типу ГПА-Ц-16С потужністю 16 МВт кінцевим тиском 12,0 МПа, який комплектується відцентровими компресорами різного типу. Позначено, що в випадку використання приводу з простим робочим циклом ефективність агрегату може визначатися як добуток ефективного ККД приводу на політропний ККД компресора. Одержані кількісні дані про вплив ККД компресора на величину ККД агрегату і витрати паливного газу при різних режимах експлуатації, а також про можливість виявлення режимів його роботи з максимальним значенням ККД (оптимальний режим) для деяких типів проточних частин компресора.

**Ключові слова:** газоперекачувальний агрегат; відцентровий компресор; газотурбінний привод; ефективність; режим роботи.

### EFFECT OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR CHARACTERISTICS ON EFFICIENCY OF GPA WITH GAS TURBINE DRIVE OF MARINE TYPE

**V.P. Parafejnik, A.N. Nefedov, I.N. Tertyshnyy, V.N. Chobenko, A.L. Lyutikov**

The results of analyses of efficiency of turbo-compressor package GPA –C-16S with power 16 MW and outlet pressure 12,0 MPa which is completed with centrifugal compressors of different types are given. It is marked, that in case of using simple working cycle the package efficiency can be obtained as product of effective efficiency of turbine drive by compressor polytropic efficiency. Quantitative data on effect of compressor efficiency on package efficiency value and fuel gas flow at different operation conditions, as well as possibility of determination of operation conditions with maximum value of efficiency (optimal condition) for some types of compressor rotor bundles are obtained.

**Key words:** turbo-compressor package, centrifugal compressor, gas turbine drive, efficiency, operation condition.

**Парафейник Владимир Петрович** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник СКБ турбокомпрессорных машин ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», Сумы, Украина, e-mail: tkm@frunze.com.ua.

**Нефедов Александр Николаевич** – старший научный сотрудник СКБ турбокомпрессорных машин ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», Сумы, Украина, e-mail: tkm@frunze.com.ua.

**Тертишний Игорь Николаевич** – магистрант кафедры технической теплофизики Сумского государственного университета, Сумы, Украина.

**Чобенко Владимир Николаевич** – начальник отдела расчётно-экспериментальных характеристик и регулирования ГТУ ГП Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.

**Лютиков Александр Леонидович** – инженер-конструктор отдела расчётно-экспериментальных характеристик и регулирования ГТУ ГП Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua.

УДК 533.9.07

А.В. ЛОЯН, Н.Н. КОШЕЛЕВ, Е.П. СОЛОНИНКО, Е.Г. АГЕЕВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ W-Ba-Sc ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД

*В работе представлены результаты предварительных испытаний W-Ba-Sc эмиттеров катодов ЭРД, которые изготовлены по разработанной авторами технологии высокотемпературной пропитки вольфрама скандатом бария с доказанным ресурсом более 30000 час при рабочей плотности тока около 100 А/см<sup>2</sup>. Описано устройство для испытания эмиттеров, а также стендовое оборудование, используемое в эксперименте. Представлена система электропитания и измерительный комплекс. Проведенные исследования определили диапазон рабочих температур, плотностей токов и напряженности поля в которых работают данные эмиттеры.*

**Ключевые слова:** эмиттер, катод, эмиссионная поверхность, работа выхода.

## Введение

Одним из наиболее важных направлений развития науки и техники в настоящее время является направление электрореактивных двигателей. Сочетая в себе уже имеющиеся знания в области материаловедения, физики плазмы, взаимодействия плазмы с поверхностью и др., это направление определяет и тенденции развития смежных областей знаний.

Например, в катодах электрореактивных двигателях широко используются материалы обладающие высокими эмиссионными свойствами. Так в разработках ОКБ «Факел», Россия применяются эмиттеры изготовленные из гексаборида лантана. Такие катоды показывают высокие эксплуатационные свойства и длительный, до 10000 час., ресурс. В аналогичных устройствах производства JPL, USA применяются импрегнированные W-Ba эмиттеры. По сообщениям катоды с такими эмиттерами обладают ресурсом до 20000 час. и более. Все эти материалы ранее или позднее использовались в технике электронно-вакуумных приборов и при незначительной модернизации были адаптированы в катодах ЭРД. Основной характеристикой эмиттеров (кроме ресурса) является рабочая плотность тока при номинальном токоотборе. Для первых это 5...7 А/см<sup>2</sup>, для вторых 5...10 А/см<sup>2</sup>. Однако такие низкие плотности тока ограничивают возможности снижения габаритных размеров и веса катодов ЭРД, а большая теплонапряженность внутрикатодных деталей и узлов заставляет конструкторов применять очень дорогостоящие материалы с высокой температурой рекристаллизации.

Уже длительное время в ХАИ ведутся работы по совершенствованию катодов [1 – 3]. Одним из

направлений этой деятельности есть разработка новых эмиссионных материалов. Результаты применения таковых обсуждаются в [4, 5]. Где показано, что применение эмиттеров импрегнированных скандатом бария может снизить вес штатных катодов типа КЭ-5 более чем в 50 раз, а доказанный ресурс в аналогичных катодным условиям на сегодняшний день превышает 30000 часов без изменения эмиссионных свойств.

Известно, что существуют эмиттеры пропитанные составом  $2,4\text{BaO} \cdot 0,6\text{CaO} \cdot 0,1 \text{Sc}_2\text{O}_3 \cdot 0,9\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые выдают плотность тока 15-20 А/см<sup>2</sup> при рабочей температуре 900 – 1000 °С [6]. Наилучшие образцы эмиттеров подобного состава выдают плотность тока до 460 А/см<sup>2</sup> при  $T = 1030 \text{ }^\circ\text{C}$  [7]. Считается, что столь существенное увеличение эффективности эмиттера происходит при образовании на окислах скандия эмиссионных центров и увеличение эмиссии за счет ее автоэмиссионной части [8].

В то же время полностью отсутствуют данные по исследованиям эмиттеров получаемых пропиткой W матрицы чистым скандатом бария состава  $\text{Ba}_3\text{Sc}_4\text{O}_9$ . По мнению авторов, это обусловлено очень высокой температурой плавления активной компоненты (около 2400 °С) и соответственно возникновению технологических проблем при изготовлении такого эмиттера. Эти трудности были преодолены. Авторами статьи была разработана технология, которая позволяет обеспечить быстрый нагрев, пропитку и охлаждение пористой W матрицы скандатом бария состава  $\text{Ba}_3\text{Sc}_4\text{O}_9$ . Как было указано ранее, такие эмиттеры длительное время успешно применяются нами при разработке катодов ЭРД нового поколения.

Однако эмиссионные свойства таких эмиттеров изучены не достаточно, не проведена оптимизация

состава пропитки. Эта статья является первой публикацией призванной закрыть данный пробел.

## 1. Стендовое оборудование

Стенд для испытания эмиттеров катодов ЭРД состоит из вакуумной системы, системы электропитания, измерительной системы, ПО обработки полученных результатов.

Вакуумная система состоит из следующих основных элементов: камеры 1, форвакуумного 10, диффузионного 7 и магниторазрядного насосов 9, приборов измерения вакуума 4, 5, 6 и клапанов 2, 3. ПГС схема и фотография стенда представлены на рис. 1.1 и 1.2.

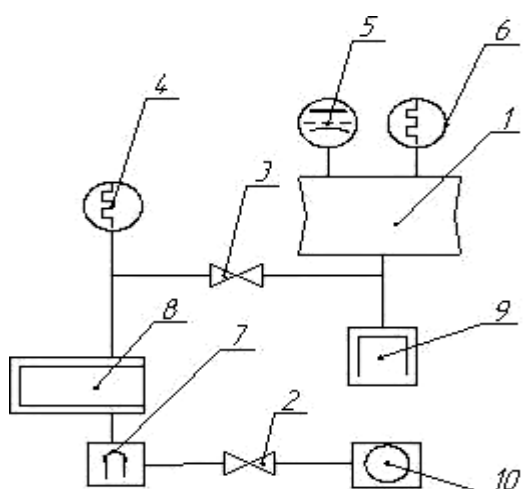


Рис.1.1. ПГС схема испытательного стенда



Рис.1.2. Фото испытательного стенда

Вакуумная камера имеет объем около 10 л и изготовлена из нержавеющей стали. Для измерения температуры образца пирометром имеется смотровое окно, изготовленное из лейкоапира. Для уменьшения времени обезгаживания, камера оснащена системой прогрева с максимальной темпера-

турой до 350 °С.

Для предварительной откачки объема вакуумной камеры используется вакуумный насос 2НВР5ДМ производительностью 5 л/с, который обеспечивает вакуум  $7...8 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст. Для высоковакуумной откачки используется диффузионный насос производительностью 100 л/с. Этот насос откачивает камеру до давления  $5 \cdot 10^{-6}$  мм. рт. ст. Для обеспечения сверхвысокого вакуума  $1 \cdot 10^{-9}$  мм. рт. ст. имеется магниторазрядный насос «НМД-0,4-1». Время выхода установки в режим начала экспериментов не превышает 4 часа.

Устройство для испытания эмиттеров (рис. 1.3) состоит из нагревательного элемента 6, который крепится к трем молибденовым ножкам 5, эмиттера 1, расположенного над нагревателем, который крепится тремя стержнями 4 изготовленными из молибдена, анодного блока 2 – расположенного над эмиттером в специальном креплении 3 (из Мо) и керамических колец 8, 9, 10, выполняющих роль изоляторов, соединяемых между собой металлическими шпильками 7. Стержни, соединяющие керамическую основу катодного и анодного блоков, изготовлены из молибдена. Благодаря этому величина зазора между диафрагмой анода и эмиттером остается неизменной в процессе нагрева образца до различных температур.

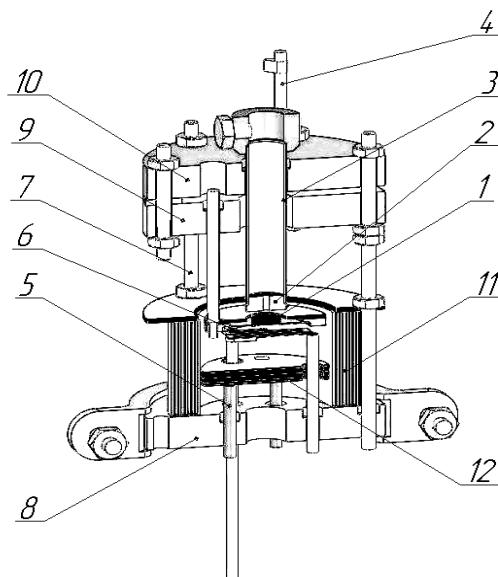


Рис. 1.3. Устройство для испытаний эмиттеров

Между нагревателем и керамической шайбой предусмотрен блок торцевых экранов (12). На керамической основе также расположены экраны (11), способствующие снижению тепловых потерь, а также уменьшению теплового потока на остальные элементы конструкции. На рис.1.4. более детально показана схема конструкция катодно-анодного узла.

Для обеспечения высоких рабочих температур нагревательный элемент изготавливался из тантала толщиной 0,1 мм. Для ограничения площади эмиссионной поверхности катода, в оправке изготавливалось отверстие диаметром 0,2 мм. Крепление оправки к опорной пластине осуществлялось точечной сваркой. Все указанные детали изготавливались из ниобия НБ1 толщиной 0,1 мм методом штамповки с промежуточным отжигом. Расстояние от поверхности эмиттера до массивного анода выполненного из вольфрама марки ВА составляет 1 мм.

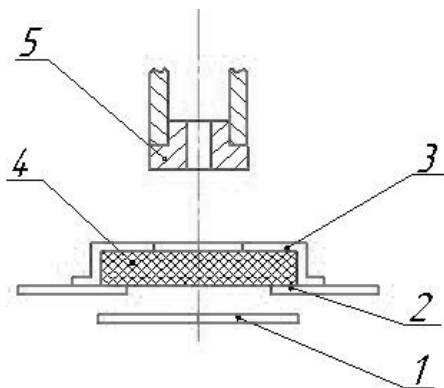


Рис. 1.4. Схема крепления образца эмиссионного материала:  
1 – нагревательный элемент, 2 – пластина опорная,  
3 – оправка, 4 – исследуемый образец, 5 – анод

На рис.1.5. представлен график зависимости температуры нагревателя от подаваемой на него мощности.

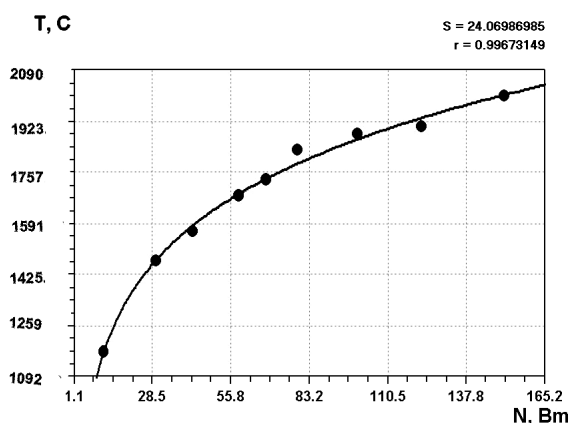


Рис. 1.5. Зависимость температуры нагревателя от подаваемой на него мощности

Очевидно, что рабочие температуры нагревателей не превышают допустимую температуру (до 2200 °C) для Ta при мощностях накала до 180 Вт. Как показали дальнейшие исследования, такой мощности достаточно для прогрева образца до температур 1700 К. Этого достаточно для проведения исследований эмиттеров катодов ЭРД.

## 2. Система электропитания и измерения

Система электропитания должна обеспечить необходимые величины тока и напряжения для питания всех элементов вакуумной системы и катодно-нагревательного узла. Она (рис. 2.1) состоит из источника питания нагревательного элемента катодно-нагревательного узла 8, импульсного источника питания разрядного промежутка, который в свою очередь делится на устройство управления импульса 13, регулятор напряжения 12 и блок питания разряда 11, источника питания системы прогрева вакуумной камеры 6, источников питания насосов.

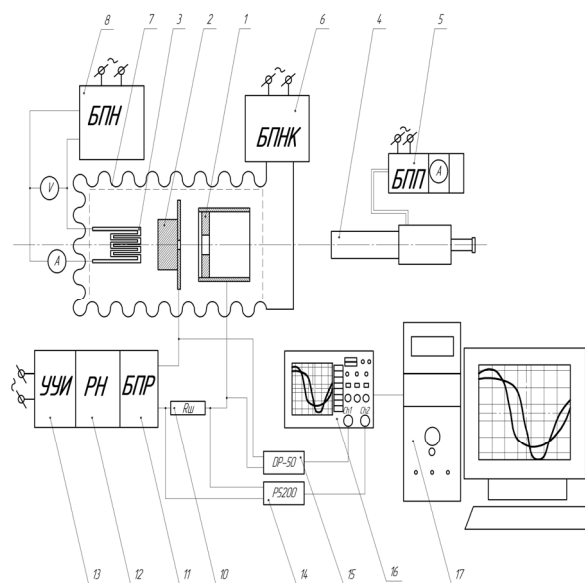


Рис. 2.1.Схема системы электропитания и измерения:

1 – анод, 2 – катод, 3 – нагреватель, 4 – пирометр, 5 – блок питания пирометра с амперметром, 6 – блок питания нагрева камеры, 7 – нагреватель камеры, 8 – блок питания нагревателя, 9 – измерительный шунт, 10 – блок питания разряда, 11 – регулятор напряжения, 12 – устройство управления импульсом, 13 – делитель для измерения тока, 14 – делитель для измерения напряжения, 15 – цифровой осциллограф, 16 – ЭВМ

Импульсный источник питания разрядного промежутка используется потому, что при постоянной нагрузке разрядного промежутка анод разогревается за счет электронного нагрева, что приводит к выходу из строя устройства.

Импульсный источник питания обеспечивает полуволну с максимальным напряжением до 7 кВ. Источник питания нагревательного элемента питает нагреватель постоянным, высокостабилизированным током до 15 А. Мощность источника 200 Вт.

В состав измерительной аппаратуры входит пирометр 4 со своей собственной системой электропитания 5 и амперметром для определения показаний

ний пирометра, осциллограф 16 с дифференциальными щупами 14, 15. Щупы дают возможность измерять показания при напряжении до 6,5 кВ.

### 3. Методика обработки

После измерения импульса напряжения и тока, данные передавались на ЭВМ, где были построены соответствующие зависимости плотности тока от напряжения на диодном промежутке при различных температурах эмиттера. Семейство кривых для различных температур показано на рис. 3.1. На рис. 3.2 представлены те же кривые только в координатах  $\lg(j) = f(E^{1/2})$ .

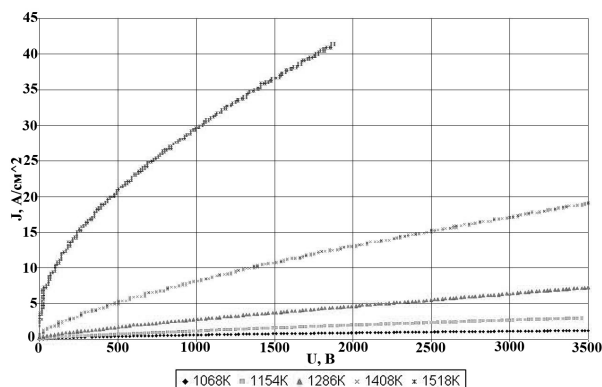


Рис. 3.1. Зависимость плотности тока от напряжения диодного промежутка

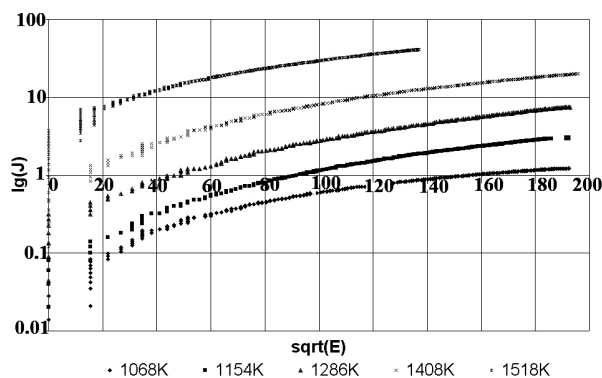


Рис. 3.2. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля в координатах  $\lg(j) = f(E^{1/2})$

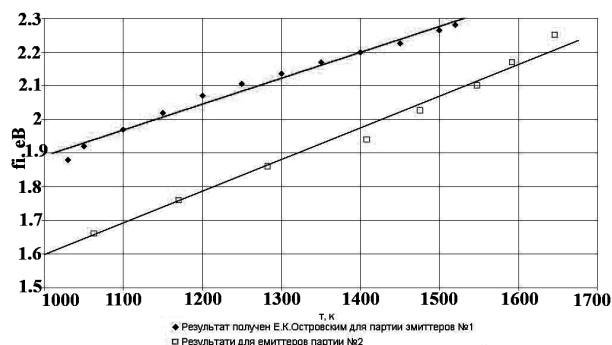


Рис. 3.3. Зависимость работы выхода от температуры эмиттера

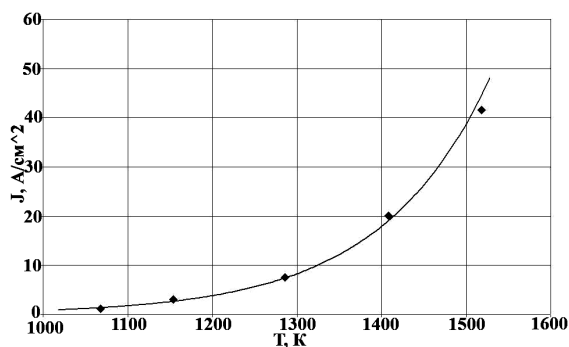


Рис. 3.4. Зависимость плотности тока от температуры эмиттера

Для дальнейшей обработки результатов использовалась методика подробно описанная в [1]. На рис. 3.3. и 3.4. представлены результаты расчета работы выхода и максимальной плотности тока от температуры эмиттера (для условий аналогичных работе эмиттера в катодах ЭРД).

### Выводы

1. Разработана технология сверхвысокотемпературной пропитки W матрицы скандатом бария состава  $Ba_3Sc_4O_9$ .
2. С помощью разработанной технологии изготовлены эмиттеры катодов ЭРД с доказанным ресурсом более 30000 час при рабочей плотности тока около  $100 \text{ A/cm}^2$ .
3. Создана стендовая база для исследований высокоэмиссионных материалов катодов ЭРД.
4. Проведенные исследования показывают, что созданные эмиттеры могут работать при плотностях тока  $150 \text{ A/cm}^2$  при температуре 1600 K и напряженности поля до 20 кВ/см.

Дальнейшие работы будут направлены на изучение взаимосвязи структуры поверхности материала и его эмиссионных свойств.

Авторы с благодарностью отмечают плодотворные дискуссии с А.П. Кислициным и Е.К. Островским.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НАКУ "ХАИ".

### Литература

1. Захарченко А.В. Прогнозирование ресурсных характеристик полых катодов / А.В. Захарченко, С.Ю. Нестеренко, А.И. Оранский // *Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьковского авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского (1996)*. – Х.: ХАИ, 1997. – С. 239-244.
2. Оранский А.И. Перспективные катоды электроракетных двигателей / А.И. Оранский // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук.*

праць. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2002. – Вип. 31. Двигуни та енергоустановки. – С. 257-259.

3. Кошелев Н.Н. Моделирование стартового нагрева безнакального катода-компенсатора для микро СПД / Н.Н. Кошелев, А.И. Цаглов, В.А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 8. – С. 116-120.

4. Koshelev N.N. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster / N.N. Koshelev., A.V. Loyan // *Presented at the 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy September 17-20, 2007*.

5. Малогабаритный катод для ЭРД / Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, О.П. Рибалов, Е.И. Ищенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8. – С. 164-166.

6. Влияние фазового состава барий-кальциевых алюмоскандатов на эмиссионные характеристики импрегнированных катодов / О.И. Гетьман, С.П. Ракитин, В.В. Паничкина, З.П. Рудь // *Порошковая металлургия*. – 2000. – № 11/12. – С. 75-82.

7. Supply and loss mechanism of Ba dispenser cathodes / G. Gartner, P. Geittner, D. Raasch, D.U. Wiechert // *Appl. Surf. Sci.* – 1999. – Vol. 146. – P. 22-30.

8. Вивчення механізму емісії високострумівимпрегнованих скандатних катодів / С.П. Ракітін, В.В. Панічкина, О.І. Гетьман, В.В. Ільченко, О.Є. Лушкін, І.І. Бех. – *Проект ДФФД: № 04.07/00026*.

Поступила в редакцію 26.04.2010

**Рецензент:** д-р тех. наук, проф. кафедри двигателів і енергоустановок летательных аппаратов А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ПОПЕРЕДНІ ВИПРОБУВАННЯ W-Ba-Sc ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРР

*А.В. Лоян, М.М. Кошелев, Є.П. Солонинко, К.Г. Агеева*

В роботі представлені результати попередніх випробувань емітерів катодів ЕРР, які виготовлені по розробленій технології високотемпературного пропитування вольфраму скандатом барію з доведеним ресурсом більше 30000 годину при робочій щільності струму близько 100 А/см<sup>2</sup>. Описаний прилад для випробування емітерів, а також стендове обладнання, що використовується в експерименті. Представлена система електроживлення та вимірювальний комплекс. Проведені дослідження визначили діапазон робочих температур, густин струмів і напруженості полів в яких працюють дані емітери.

**Ключові слова:** емітер, катод, емісійна поверхня, робота виходу.

### PRELIMINARY TESTING OF W-Ba-Sc EMITTERS OF EPT CATHODES

*A.V. Loyan, N.N. Koshelev, Ye.P. Solonynko, E.G. Ageeva*

The work presents results of preliminary testing of emitters of EPT cathodes which were made by the developed technology of high-temperature impregnation tungsten with BaSc with a proven resource of more than 30000 hours at an operating current density of about 100 A/cm<sup>2</sup>. Device for emitter testing, and test-bed equipment which were used in experiment were described. Power-supply system and measuring equipment are presented. Studies have identified a range of operating temperatures, current densities and field strength in which employing these emitters.

**Key words:** emitter, cathode, emission surface, work function.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

**Кошелев Николай Николаевич** – старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Солонинко Евгений Павлович** – инженер кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: SolonynkoYevgen@gmail.com.

**Агеева Екатерина Геннадьевна** – студентка кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

УДК 629.7:621.3

С.В. ГУБИН, М.Н. НАКАЗНЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## МОДИФИКАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

*Установлено, что успешное решение задач моделирования разрядной характеристики электрохимического накопителя в случае использования зашумленной информации возможно за счет применения многофакторных нейросетевых моделей. В результате исследования предложена методика построения высококачественной нейросетевой математической модели, которая включает четыре этапа: предобработка данных; определение входов нейронной сети; разработка архитектуры нейросетевой модели и ее обучение; эксплуатация нейронной сети. Разработана нейросетевая модель, позволяющая с высокой степенью точности моделировать работу электрохимического накопителя.*

**Ключевые слова:** электрохимический накопитель, нейросеть, моделирование, предобработка, эксперимент, точность.

### Введение

Качественный скачок в индустрии систем энергоснабжения напрямую связан с повышением требований к качеству электроснабжения как общепромышленных, так и специальных объектов. К сожалению устаревшие, зачастую выработавшие свой ресурс, отечественные энергосистемы и сети не способны обеспечить необходимые требования. Еще одной проблемой является также то, что установленные в нашей стране нормы качества энергоснабжения, оказываются хуже, чем требования к электропитанию дорогостоящего современного оборудования специального, промышленного, бытового назначения. Ввиду сложившейся ситуации перед разработчиками энергоустановок остро стоит проблема организации качественного энергоснабжения. Одним из эффективных методов разработки систем энергоснабжения на стадии проектирования является математическое моделирование.

### 1. Постановка задачи

Основной целью работы является модификация нейросетевой модели для симуляции работы электрохимического накопителя (ЭХН) в составе системы энергоснабжения.

Исходными данными для моделирования являлись статистические данные работы кислотного аккумулятора.

Для модификации нейросетевой модели были выбраны модель многослойного персептрона, определены 2 зависимых и один независимый параметр, а именно: ток нагрузки ЭХН ( $I$ ) и время его работы ( $t$ ), как независимые, рабочее напряжение аккумулятора – зависимый.

### 2. Экспериментальное исследование и предварительная обработка данных

Задачей эксперимента исследования кислотного аккумулятора является накопление экспериментальных данных для построения нейросетевой модели разрядной характеристики герметичного кислотного аккумулятора. Поэтому, контрольно-измерительное оборудование стенда должно соответствовать необходимой точности, что в дальнейшем уменьшит трудоемкость обработки экспериментального материала и позволит, построит более точную модель.

Ввиду специфики моделирования, снятие характеристик должно происходить при постоянном токе, поэтому в экспериментальной установке должно быть предусмотрено зарядное и разрядное устройство соответствующее этому требованию – выдерживающее в допустимых пределах постоянный ток в течении всего эксперимента.

Учитывая особенности работы свинцовых аккумуляторов, можно выделить еще одно требование к эксперименту и к стенду – в течении эксперимента должно строго контролироваться напряжение конца заряда или разряда, чтобы предотвратить недопустимые режимы работы аккумуляторной батареи.

Предобработка данных позволит на ранних этапах нейромоделирования уменьшить время моделирования и увеличить точность модели.

На первом этапе подготовки данных было принято решения провести кластеризацию данных, это позволило исключить, главным образом, неточности измерений. В качестве алгоритма кластеризации выберем субтрактивный алгоритм. Основу

алгоритма, составляют идеи горного метода кластерного анализа, который был предложен Рональдом Ягером и Димитаром Филевым.[1]

На следующем этапе предобработки была проведена нормировка данных. С использованием функции активации нейрона нейросети. Это решение позволило адаптировать экспериментальные данные под нейросеть и, следовательно, улучшить ее качество.

Предобработка экспериментальных данных разрядных характеристик кислотного аккумулятора при разных токах разряда проводилась с помощью программного комплекса MatLab 7. Результаты предобработки приведены на рис. 1.

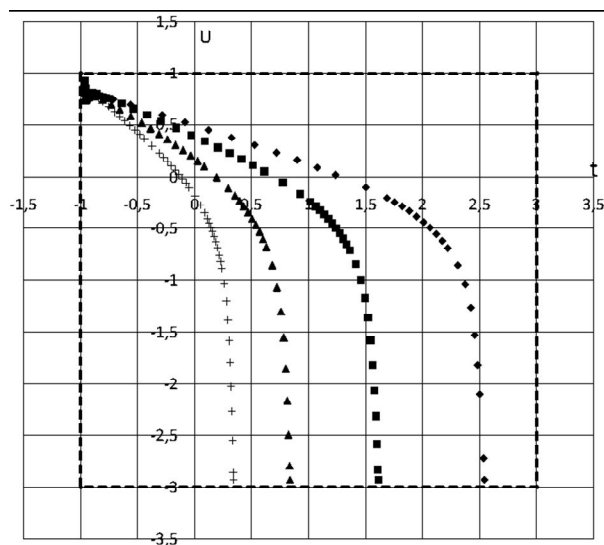


Рис. 1. Результаты предобработки экспериментальных данных разрядных характеристик кислотного аккумулятора: крестики – ток разряда  $0,2Q_n$ ; треугольники –  $0,14Q_n$ ; квадраты –  $0,1Q_n$ ; ромбы –  $0,07Q_n$

### 3. Разработка нейросетевой модели

В качестве описания разрядных и зарядных характеристик в кислотном аккумуляторе была выбрана, специально созданная для аппроксимации многомерных нелинейных функций нейросеть - трехслойный персептрон, обученный с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [2] с функцией активации нейронов в скрытом слое гиперболический тангенс, а в выходном слое – линейная.

Таким образом, разрядная характеристика будет представляться в виде суммы функций времени и тока:

$$U(I, t) = \varphi_L \left\{ \sum_{i=1}^n \left( WL_i \cdot \tanh \left[ I \cdot WI_i^I + t \cdot WI_i^t + b_i^1 \right] \right) + b^2 \right\},$$

где  $WL$ ,  $WI^I$  и  $WI^t$  – вектора весов синапсов между скрытым и выходным, и между входным и скрытым слоями нейронов соответственно, подлежащие определению;  $b^1$ ,  $b^2$  – вектора смещений каждого нейрона скрытого и выходного слоя соответственно (подлежат определению);  $n$  – количество нейронов в слое.

Результаты моделирования зарядной характеристики приведены на рис. 2.

Поверхностью черного цвета показана экспериментальная разрядная характеристика БХ, а серым – смоделированная.

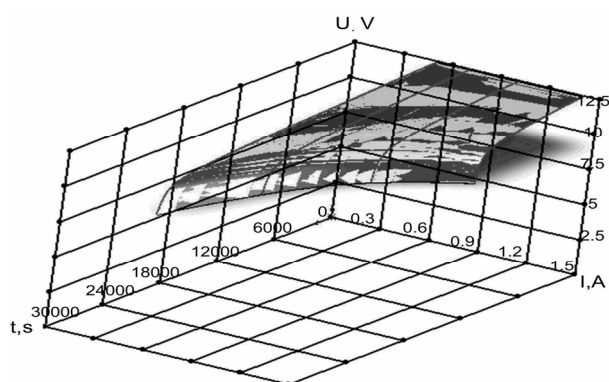


Рис. 2. Разрядная характеристика свинцового аккумулятора

### 4. Оценка результатов моделирования

Для оценки результатов рассмотрим (рис. 2) смоделированную разрядную характеристику (серый цвет) и экспериментальную (черный цвет). Среднеквадратическое отклонение моделирования сети  $5,2 \times 10^{-4}$  при заданном уровне 0,001. Также адекватность модели была проверена по критерию Фишера. Рассчитанное значение критерия Фишера  $F$  не превышает критического значения  $F_{кр}$ , т.е.  $F \leq F_{кр}$ , это говорит о том, что с вероятностью 99,95 % данные, полученные с помощью математической модели и данные эксперимента принадлежат одной совокупности, а значит, данная математическая модель является адекватной и может быть использована для дальнейших исследований.

### Выводы

1. Установлено, что успешное решение задач моделирования разрядной характеристики электрохимического накопителя в случае использования зашумленной информации возможно за счет применения многофакторных нейросетевых моделей.

2. В результате исследования предложена методика построения высококачественной нейросетевой модели.

вой математической модели, которая включает четыре этапа: предобработка данных; определение входов нейронной сети; разработка архитектуры нейросетевой модели и ее обучение; эксплуатация нейронной сети.

3. Выполнена модификация нейросетевой модели на основе многослойного персептрона, позволяющая с высокой степенью точности моделировать работу ЭХН.

## Литература

1. Bouchon-Meunier B. *Technologies for Constructing Intelligent Systems 1: Tasks* / B. Bouchon-Meunier, J. Guiterrez-Rios, L. Magdalena and R. R. Yager. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. – 458 p.

2. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс* / С. Хайкин; пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

Поступила в редакцию 31.05.2010

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков.

## МОДИФІКАЦІЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА У СКЛАДІ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ

*С.В. Губін, М.М. Наказненко*

Установлено, що успішне вирішення задач моделювання розрядної характеристики електрохімічного накопичувача в випадку використання зашумленої інформації можливе за рахунок використання багатofакторних нейромережових моделей. В результаті дослідження було запропоновано методику побудови високоякісної нейромережової математичної моделі систем електрохімічного накопичувача, котра включає чотири етапи: попередньої обробки даних, визначення входів нейромережі, розробка архітектури нейромережової моделі та її навчання, експлуатація нейромережі. Розроблена нейромережева модель, що дозволяє з високою точністю моделювати роботу електрохімічного накопичувача.

**Ключові слова:** електрохімічний накопичувач, нейромережа, моделювання, попередня обробка, експеримент, точність.

## NEURAL MODELS MODIFICATION OF ELECTROCHEMICAL STORAGE OF POWER SYSTEM

*S.V. Gubin, M.N. Nakaznenko*

It is defined, that the successful solution problems of modeling discharge performance of electrochemical storage in case at a noisy data is possible by using multi-neural network models. As a result of the study the method of constructing high-quality mathematical model of electrochemical storage was offered, which included four stages: pre-processing data, identifying inputs neural networks, architecture of neural model development and its training, neural networks maintenance. The developed neural models that allow highly accurate modeling work electrochemical storage.

**Key words:** electrochemical storage, neural network, modeling, pre-processing, experiment, accuracy.

**Губин Сергей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой двигателей и энергетических установок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: gubinsv@d4.khai.edu.

**Наказненко Максим Николаевич** – аспирант кафедры ракетных двигателей и энергоустановок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Tenor1709@list.ru.

УДК 621.43-242

С.А. АЛЁХИН, В.Г. КОНДРАТЕНКО, В.И. ВАХРУШЕВ, В.К. САВИЧ

КП «Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению», Украина

## ДИАГНОСТИКА ПРЕДЗАДИРНОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРОТИВОПОЛОЖНО ДВИЖУЩИМИСЯ ПОРШНЯМИ

*Представлена методика и аппаратное обеспечение диагностики предзадирного состояния цилиндропоршневой группы дизельных двигателей типа 5ТДФ, 6ТД и 3ТД с противоположно движущимися поршнями. Методика базируется на первичном признаке задира – увеличении трения между поршнем и гильзой цилиндра. Основу аппаратного обеспечения данной методики составляют индукционный датчик, усилительно-преобразовательный блок, блок автоматики и персональный компьютер, оснащённый аналого-цифровым преобразователем на базе платы L-783 с высокопроизводительной шиной и программным обеспечением Power Graph. Использование данной методики и аппаратуры позволило предотвратить крупные аварии двигателей и обеспечить решения по выбору профиля поршня и рациональных зазоров в цилиндропоршневой группе, что позволило сократить сроки доводки дизелей.*

**Ключевые слова:** дизельные двигатели, диагностика, цилиндропоршневая группа, персональный компьютер с АЦП.

### Введение

В КП ХКБД ведутся работы по созданию семейства комбинированных двухтактных дизелей с наддувом типа 6ТД литровой мощностью более 65 кВт/л.

В настоящее время в серийном производстве на ГП "Завод имени В.А. Малышева" изготавливаются двигатели 6ТД-2 мощностью 1200 л.с., что соответствует литровой мощности 54 кВт/л. Повышение мощности на 20% по отношению к базовому дизелю осуществляется за счёт увеличения давления наддува, увеличения цикловой подачи топлива и частоты вращения коленчатого вала. Это приводит к увеличению теплового состояния и динамических нагрузок деталей цилиндропоршневой группы, в основном определяющих надёжность работы данного типа дизеля.

Ужесточение условий работы цилиндропоршневой группы повлекли за собой необходимость поиска новых конструктивных решений, расчётных и экспериментальных исследований. Важной задачей в этой работе является экспериментальное определение граничных условий, когда наступает отказ, выражающийся в задирах поршня.

При задирах алюминиевого поршня происходит наволакивание алюминия на рабочую поверхность цилиндра, что приводит к заклиниванию поршня и, как следствие, к сдвигу гильзы цилиндра и выходу из строя остова – самой дорогой и трудоёмкой в изготовлении сборочной единицы двигателя.

### Результаты исследований

С целью предотвращения таких последствий была предложена методика и разработана аппаратура диагностики предзадирного состояния ЦПГ и аварийной остановки двигателя в начальной стадии задира.

Методика базируется на первичном признаке задира – увеличении трения между поршнем и гильзой цилиндра.

В конструкции двигателей с противоположно движущимися поршнями на гильзу цилиндра действуют силы трения двух поршней, большую часть времени движущихся в разные стороны. На участках "мёртвых точек" имеются зоны, составляющие примерно 10° по углу поворота коленчатого вала, когда усилия от действия поршней на гильзу складываются. На остальных участках суммарное усилие на гильзу значительно меньше усилия от одного поршня. При задирах поршня из-за увеличения силы трения характер и величина усилий на гильзу цилиндра резко изменяются в сравнении с беззадирной работой. Усилие от гильзы к блоку параллельно передаётся через несколько элементов: уплотнительные кольца на гильзе, корпуса форсунок и стопорный палец, а также трение между гильзой и блоком.

В качестве чувствительного элемента для оценки сил трения между поршнем и гильзой выбран стопорный палец. Такой выбор объясняется тем, что передача усилий через стопорный палец происходит только через металлические контакты,

которые обеспечивают наиболее стабильную передачу сигнала.

Разработан оригинальный способ фиксации начальной стадии задира, основанный на том, что перемещение гильзы цилиндров относительно блока пропорционально силе трения между поршнем и гильзой. Для этого в стопорный палец 1 (рис. 1) вворачивался измерительный болт 2, головка которого являлась чувствительным элементом индукционного датчика 3. При возникновении повышенного трения в паре поршень-цилиндр увеличивается нагрузка на стопорный палец, что приводит к его деформации и, в конечном счёте, к перемещению головки болта. Это перемещение фиксируется индукционным датчиком и регистрируется вторичной аппаратурой.

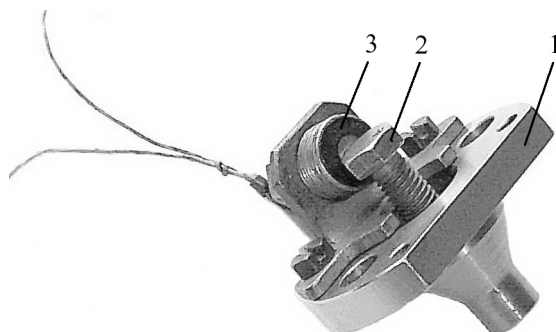


Рис. 1. Способ фиксации начальной стадии задира

В исходном варианте аппаратуры контроля предзадирного состояния сигналы с датчиков всех цилиндров поступали по линии связи на вход многоканального усилителя тока. Усиленные по напряжению и мощности сигналы подавались параллельно на блок автоматики и для регистрации на многоканальный светолучевой осциллограф, позволяющий получить проявленную осциллограмму в течение 1 – 2 минут после регистрации и использовать информацию для принятия решения. Блок автоматики непрерывно сравнивал уровни поступающих сигналов с заданным уровнем порога. При превышении порога любым из сигналов вступала в работу схема автоматики.

Основной недостаток исходного варианта заключается в том, что время между началом задира и принятием решения может достигать нескольких минут. Тогда, как показала практика, задрин может произойти за 15 – 20 с.

Появление нового материально-технического и программного обеспечения позволило модернизировать аппаратуру диагностики контроля предзадирного состояния.

Функциональная схема аппаратуры представлена на рис. 2.

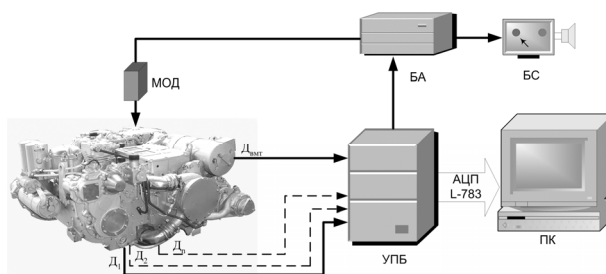


Рис. 2. Функциональная схема аппаратуры

Сигналы с датчиков  $D_1 \dots D_n$  установленных на стопорных пальцах всех цилиндров и датчика верхней мёртвой точки  $D_{ВМТ}$  одного из цилиндров поступают на усилительно-преобразовательный блок (УПБ).

Основными элементами УПБ по числу каналов являются: интегрирующий усилитель, усилитель напряжения, фильтр, детектор, стрелочный индикатор и общая для всех каналов схема "ИЛИ".

Интегрирующий усилитель служит для преобразования скорости изменения магнитного поля чувствительного элемента индукционного датчика в сигнал, пропорциональный перемещению головки стопорного болта и, следовательно, силе трения в паре «поршень-цилиндр».

После интегрирования и усиления (с целью увеличения помехозащищённости измерительных каналов) сигналы фильтруются активным фильтром и поступают через амплитудные детекторы на стрелочные индикаторы для их визуального контроля по уровню и установки порога срабатывания блока автоматики (БА).

Кроме того, после фильтра сигналы от всех контролируемых цилиндров поступают на персональный компьютер (ПК), оснащённый аналогово-цифровым преобразователем на базе платы L-783 с высокопроизводительной шиной и программным обеспечением Power Graph.

Применение функциональных возможностей пакета Power Graph позволяет принимать и отображать текущие данные, а также сохранять аналоговые сигналы всех измерительных каналов в доступном для дальнейшего использования формате, выделять участки данных для редактирования, анализа и печати, строить графики максимальных амплитуд.

На схеме "ИЛИ" происходит сборка сигналов амплитудных детекторов и наибольший из них подаётся на блок автоматики.

Основным элементом блока автоматики является компаратор, на один из входов которого подаётся наибольший сигнал от схемы "ИЛИ", а на второй регулируемый уровень порога срабатывания.

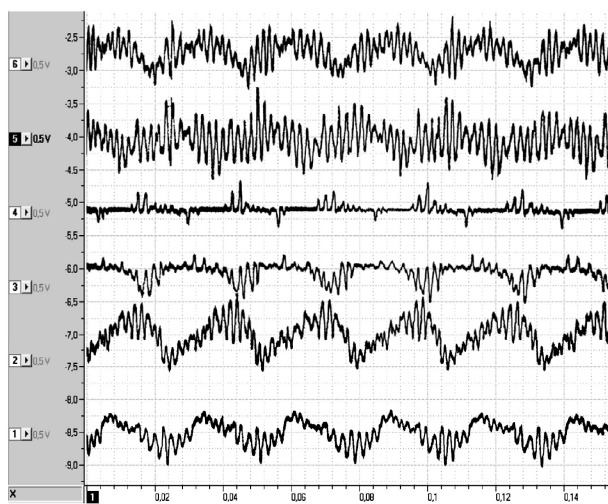
При превышении сигналом уровня порога срабатывания компаратор включает световую сигнали-

зацию, а через 0,5 с звуковую сигнализацию (блок сигнализации – БС). Если уровень сигнала продолжает превышать порог срабатывания, то блок автоматически через 5 с выдаёт сигнал на механизм остановки двигателя (МОД).

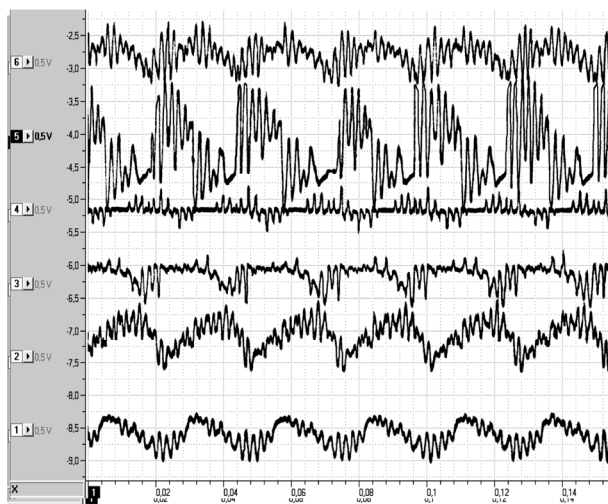
В случае уменьшения сигнала до уровня ниже порога срабатывания схема логики возвращается в исходное состояние.

На рис. 3 представлены осциллограммы таких сигналов шестицилиндрового двигателя:

- а) при нормальной работе;
- б) при начале задира пятого цилиндра.



а – нормальная работа



б – начало задира пятого цилиндра

Рис. 3. Осциллограммы сигналов шестицилиндрового двигателя

Данная методика и аппаратура контроля предзадиристого состояния ЦПГ эффективно используется при доводке двигателей специального назначения типа 5ТДФ, 6ТД и 3ТД.

Было произведено более 30 аварийных остановок двигателей с диагностикой начала задира ЦПГ.

Последующая разборка двигателей подтвердила правильность остановок двигателей, что позволило предотвратить крупные аварии и обеспечить решение задач по выбору рациональных зазоров в цилиндро-поршневой группе и отработке профиля корпуса поршня для различных условий работы.

На рис. 4 представлены фотографии поршней после аварийной остановки.



Без задира



Слабый заDIR



Более сильный заDIR

Рис. 4. Фотографии поршней после аварийной остановки:

- 1 – поршень без задира;
- 2, 3 – поршни с разной степенью задира.

Использование ПК и возможностей программного обеспечения Power Graph [1] позволило оперативно регистрировать, визуализировать, обрабатывать и хранить аналоговые сигналы, что исключило применение громоздких средств регистрации и обработки.

## Литература

1. Power Graph Professional [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://scdist.com/showthread>.

Поступила в редакцию 22.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. кафедры ДВС А.В. Пылев, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### ДІАГНОСТИКА СТАНУ ПЕРЕД ЗАДИРОМ ЦИЛІНДРОПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ДВИГУНІВ З ПОРШНЯМИ, ЯКІ РУХАЮТЬСЯ ПРОТИЛЕЖНО

*С.О. Альохін, В.Г. Кондратенко, В.І. Вахрушев, В.К. Савіч*

Представлено методику й апаратурне забезпечення діагностики предзадирного стану циліндропоршневої групи дизельних двигунів типу 5ТДФ, 6ТД і 3ТД з поршнями, які рухаються протилежно. Методика базується на первинній ознаці задиру – збільшенні тертя між поршнем і гільзою циліндра. Основу апаратного забезпечення даної методики складають індукційний датчик, посилювально-преобразуючий блок, блок автоматики і персональний комп'ютер, оснащений аналого-цифровим перетворювачем на базі плати L-783 з високопродуктивною шиною і програмним забезпеченням Power Graph. Використання даної методики й апаратури дозволило запобігти великим аваріям двигунів і забезпечити рішення про вибір профілю поршня і раціональних зазорів у циліндропоршневої групі, що дозволило скоротити терміни доведення дизелів.

**Ключові слова:** дизельні двигуни, діагностика, циліндропоршнева група, персональний комп'ютер з АЦП.

### DIAGNOSTICS OF PRESCUFFING CONDITIONS OF PISTON-CYLINDER GROUP OF OPPOSED-PISTON ENGINES

*S.A. Alyokhin, V.G. Kondratenko, V.I. Vakhrushev, V.K. Savich*

The technique and instrument provision of diagnostics of prescuffing conditions of piston-cylinder group of opposed-piston diesel engines of 5TD, 6TD and 3TD type is presented. The technique is based on a primary sign of scuffing – an increase of friction between a piston and a cylinder liner. The basis of the instrument provision of the given technique is made from an inductive sensor, an amplifier-converting unit, an automation unit and a personal computer equipped with an analog-digital converter on the basis of board L-783 with the high-efficiency bus and software Power Graph. The use of the given technique and the equipments has allowed to prevent large failures of engines and to provide decisions on the choice of the piston profiles and rational clearances in the piston-cylinder group that has allowed reducing terms of operational development of diesel engines.

**Key words:** diesel engine, diagnostics, piston-cylinder group, personal computer with analog-digital converter.

**Алехин Сергей Алексеевич** – генеральный конструктор Казённого предприятия "Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению", Харьков, Украина, e-mail: [hkbd@kharkov.ukrtel.net](mailto:hkbd@kharkov.ukrtel.net).

**Кондратенко Валерий Григорьевич** – начальник сектора Казённого предприятия "Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению", Харьков, Украина, e-mail: [hkbd@kharkov.ukrtel.net](mailto:hkbd@kharkov.ukrtel.net).

**Вахрушев Виктор Иванович** – ведущий инженер Казённого предприятия "Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению", Харьков, Украина, e-mail: [hkbd@kharkov.ukrtel.net](mailto:hkbd@kharkov.ukrtel.net).

**Савич Виктор Константинович** – начальник отдела Казённого предприятия "Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению", Харьков, Украина, e-mail: [hkbd@kharkov.ukrtel.net](mailto:hkbd@kharkov.ukrtel.net).

УДК 621.43.

Е.К. ГОРДИЕНКО, А.В. БЕЛОГУБ

ОАО «АВТРАМАТ», Харьков, Украина

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПАЛЬЦЕВОГО ОТВЕРСТИЯ ПОРШНЯ ДВС

*Рассмотрен вопрос повышения производительности механической обработки отверстия под поршневой палец в теле поршня за счет уменьшения времени обработки. Уменьшение времени обработки предложено осуществить путем структурно-параметрических изменений маршрута технологического процесса. Концентрация операций в предлагаемом маршруте механической обработки поршня требует изменений либо оснастки и инструмента, либо станочного оборудования. Проведен анализ существующего режущего и вспомогательного инструментов, с учетом полученных результатов предложена конструкция более совершенного инструмента, обеспечивающего требования технологического маршрута без усложнения станочного оборудования.*

**Ключевые слова:** производительность механической обработки, пальцевое отверстие, борштанга, режущий инструмент, расточной инструмент, технологический маршрут.

### Введение

ОАО «АВТРАМАТ» ведет постоянную работу по снижению себестоимости продукции и повышению её качества. Поиск новых технологических решений, рационализаторские меры в отношении либо существующих технологических процессов, либо совершенно новых, преследуют цели повышения точности и снижения времени изготовления. Хорошие результаты достигаются благодаря структурно-параметрическим изменениям технологического процесса, то есть не только изменениям параметров внутри перехода, а и изменениям самого технологического маршрута.

В ходе работы был определен наиболее эффективный из возможных технологических маршрутов механической обработки поршня по параметрам точности и производительности (рис. 1, а). Для его осуществления возникла потребность в новой методологии конструкторско-технологической подготовки производства. Отдельные методы уже были описаны в [1] и [2]. Настоящая работа посвящена обработке пальцевого отверстия (ПО).

Переход от «общепринятого» маршрута обработки (рис. 1, а) к «новому» маршруту (рис. 1, б) в отношении обработки ПО выражается в объединении операций 3 и 5 (рис. 1, а) в одну (рис. 1, б, операция 2). Пока токарные операции 1 и 4 (рис. 1, а) были разделены, не составляло труда ввести между ними операцию 3 (рис. 1, а) предварительной расточки ПО с установкой на «вспомогательную базу». Данная операция (черновая расточка) главным образом была необходима для снятия литейного уклона вместе с рисками, выполняющими функцию цен-

тров кристаллизации (рис. 2). В качестве режущего инструмента обычно использовался либо двухперый зенкер, либо борштанга (с одним или двумя твердосплавными резцами). Чистовая расточка ПО выполнялась борштангой с двумя резцами (первый – твердосплавный, второй – СКМР). То есть для получения полноценного ПО, необходимо было выполнить четыре (минимум три) перехода. Но и при этом зачастую возникали вибрации при обработке, особенно на протяженных ПО малого диаметра.

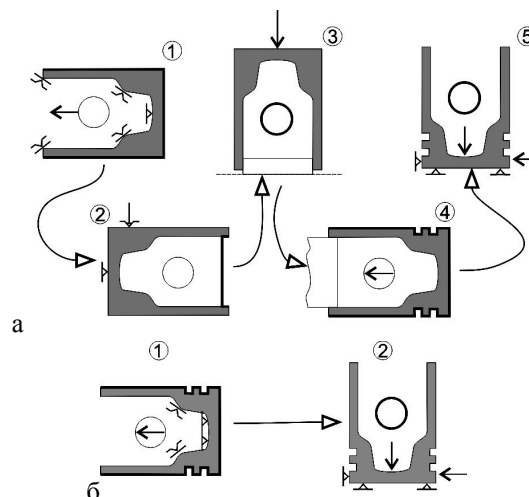


Рис. 1. Технологический маршрут механической обработки поршня (а – общепринятый; б – предлагаемый, более совершенный)

Концентрация операций, как показано на рис.1 б, способствует повышению точности изготовления, так как ПО выполняется без переустановки на одной установочной базе. Но это также влечет за собой усложнение оборудования – переход к

двухмостовой схеме. В данной работе предлагается уйти от двухмостовой схемы обработки за счет создания режущего инструмента более совершенной конструкции и вести обработку ПО за два перехода одной борштангой.

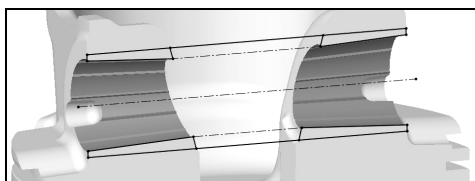


Рис. 2. Литьевые уклоны необработанного ПО

## Особенности обработки ПО

К ПО поршня двигателя внутреннего сгорания предъявляются жесткие требования. С точки зрения технологии - это обеспечение ряда параметров, характеризующих данную поверхность:

- 0,0055..0,006 мм - допуск на диаметральный размер (для Ø18 мм это соответствует 4-му качеству);
- 0,003 мм - допуск цилиндричности;
- 0,02/100 мм - допуск перпендикулярности относительно боковой поверхности поршня;
- Ra 0,63 мкм – параметр шероховатости.

Материалы, используемые для изготовления поршней – легированные алюминиевые сплавы с содержанием Si 12% и более.

В табл. 1 приведены длины и диаметры ПО поршней различных моделей. Известно, что чем больше диаметр и меньше длина ПО, тем легче его обработать. Ещё одна сложность при обработке ПО связана с неравномерностью припуска (рис. 2). Это вызвано наличием литьевых уклонов для разборки оснастки и кристаллизационных ребер для интенсивного охлаждения частей отливки. Для обеспечения соосности отверстий бобышек они обрабатываются совместно.

Таблица 1

Длины и диаметры ПО поршней

| Обозначение                                                  | Ø ПО | Длина | Ø/длина |
|--------------------------------------------------------------|------|-------|---------|
| 21083-1004015                                                | 22,0 | 68    | 0,32    |
| 2457-1004015                                                 | 20,0 | 67    | 0,30    |
| 21128-1004015                                                | 19,0 | 66    | 0,29    |
| T150-1004015                                                 |      |       |         |
| Daewoo Lanos (1,5L)                                          | 18,0 | 58    | 0,31    |
| 21126-1004015                                                | 18,0 | 59    | 0,31    |
| 11194-1004015                                                | 18,0 | 54    | 0,33    |
| Д24023ДН<br>(компрессорный поршень)                          | 18   | 70    | 0,26    |
| 130-3509160-02<br>Панежеио Аурида<br>(компрессорный поршень) | 12,5 | 60    | 0,21    |

## Изучение существующих аналогов

На предприятии имеется опыт использования двух конструктивных исполнений борштанг:

- с угловым расположением резцов;
- с вертикальным расположением резцов.

Угловое расположение резцов (рис. 3) обычно используется в условиях ограниченности пространства – для борштанг малого диаметра. Данное конструктивное решение позволяет сделать резцы немного длиннее, по сравнению со схемой (рис. 4). К недостаткам можно отнести: малую жесткость борштанги, так как тело инструмента ослаблено регулировочными винтами; а также неудобство регулировки, так как вершина резца и паз регулировочного винта расположены с одной стороны. По такой схеме была изготовлена чистовая борштанга и успешно применена при обработке поршней 130-3509160-02 (табл. 1). Поршни обрабатываются за 3 перехода, помимо схемы расположения, в ходе наладки операции были экспериментально подобраны углы резания для чистового резца, а на саму чистовую борштангу был установлен виброгаситель.

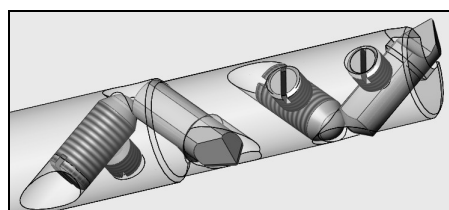


Рис. 3. Угловое расположение резцов

Вертикальное расположение резцов применяется на поршнях с диаметром ПО 17 мм и более. Такая схема предпочтительнее в отношении жесткости борштанги. Диаметр борштанги фактически определяет длину резца. Часть длины «съедает» регулировочный винт. Зачастую нет возможности поставить регулировочный винт на первый резец, что затрудняет наладку. К недостатку данной схемы можно отнести то, что величина снимаемого припуска определяет начальный диаметр борштанги, который может быть ограничен конструктивно минимальной длиной резца. Следствием этого является невозможность получить ПО за два перехода одной борштангой.

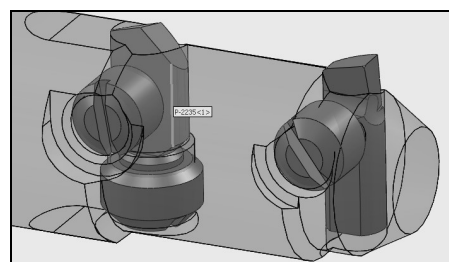


Рис. 4. Вертикальное расположение резцов

Все борштанги на заводе являются цельноточеными, что весьма расточительно, так как коэффициент использования материала (КИМ) для относительно короткой борштанги равен 0,17, а по мере увеличения длины КИМ будет уменьшаться. Для повышения КИМ необходимо изменить конструкцию борштанги – выполнить её сборной. Для этого необходимо определиться с видом соединения и технологией изготовления работоспособной борштанги.

Раскладываем усилие резания на общеизвестные [3] составляющие  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . В дальнейшем будем учитывать, что возможность борштанги воспринимать осевое усилие резания (составляющая  $P_x$ ) практически неограниченна, тангенциальное усилие ( $P_z$ ) определяется диаметром борштанги (изгибной жесткостью), радиальное усилие ( $P_y$ ) – диаметром борштанги и вылетом резца (изгибной жесткостью).

### Совершенствование конструкции

Идеология новой конструкции заключается в объединении преимуществ конструкций, используемых на предприятии, перераспределении и снижении усилий резания за счет изменения геометрии режущего инструмента и снижения себестоимости изготовления инструмента.

Изменения конструкции борштанги:

1. Тело борштанги выполнено сборным. Фланец и стержень собраны с натягом и обработаны совместно (рис. 5, а, б). Это позволило увеличить КИМ больше чем в 2 раза с 0,17 до 0,37. Результаты эксплуатации показали, что данная борштанга по работоспособности и надежности не уступает цельноточеной.

2. Применена комбинированная схема расположения резцов (рис. 5, в). Первый резец – черновой (наклонный), срезает весь неравномерный припуск, включая литейные риски, оставляя лишь небольшой припуск под чистовую обработку. Второй резец – чистовой, расположен также как в предшествующей конструкции (рис. 4). Наклонный резец хорошо зарекомендовал себя на практике. Было замечено, что благодаря хорошему отводу стружки удается снимать большие припуски. К тому же такой конструктив позволяет выполнить борштангу более жесткой, так как нет необходимости уменьшать её диаметр для лучшего отвода стружки, как показано на рис. 4, а также можно выполнить ее на 5 мм короче за счет большего вылета резца. Расположение регулировочного винта более удобно для выполнения наладки. Угол наклона резца равен  $35^\circ$ . Он был определен из условий компоновки: расстояние между вершинами резцов заранее определено шириной бобышки – резцы не должны находиться в работе одновременно.

Режущий инструмент был выполнен в соответствии с требованиями операции и опираясь на теоретические основы резания [3].

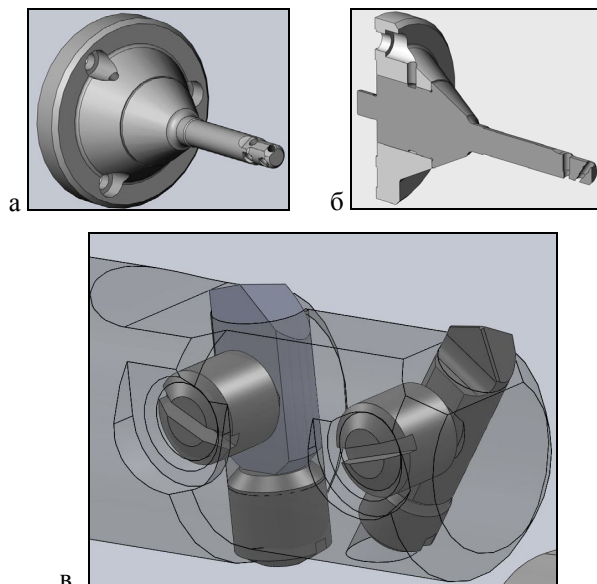


Рис. 5. Борштанга с учетом недостатков аналогов: а – внешний вид; б – сборная конструкция; в – схема расположения резцов

#### 1. Черновой резец

- Главный угол в плане равен  $87^\circ$ . Известно, что увеличение данного угла способствует уменьшению  $P_y$  и возрастанию  $P_x$ .

- Передний угол равен  $12^\circ$ . Увеличение переднего угла способствует уменьшению всех трех составляющих  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , причем  $P_x$  и  $P_y$  в большей степени. Существует возможность увеличения переднего угла не только за счет самого резца, а за счет конструкции борштанги – смещения плоскости резца относительно оси борштанги (рис. 6). Даже незначительное смещение, на 0,78 мм на диаметре 18 мм приводит к изменению переднего угла на  $5^\circ$ .

- Радиус при вершине выполнен минимально возможным для уменьшения  $P_z$ .

#### 2. Чистовой резец

- Главный угол в плане равен  $45^\circ$ . Это увеличивает составляющую  $P_y$  но одновременно повышает стабильность обработки. Также необходимо учитывать тот факт, что чистовой резец находится ближе к фланцу борштанге, снимаемый припуск значительно меньше, следовательно, он работает в заведомо лучших условиях.

- Передний угол равен  $0^\circ$ . Существует возможность его увеличения таким же способом, как и в случае чернового резца (рис. 6).

- Радиус при вершине обычно равен 0,1 мм, но возможно его дальнейшее увеличение. Подбор радиуса целесообразно производить совместно с изменением подачи.

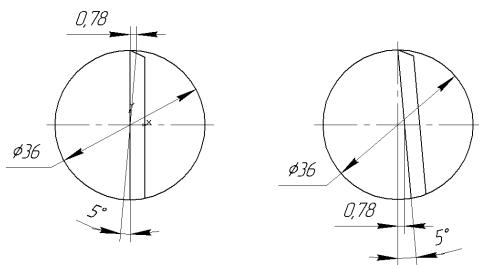


Рис. 6. Изменение переднего угла за счет смещения плоскости реза относительно оси борштанги.

## Результаты

Новая конструкция была успешно опробована в ОАО «АВТРАМАТ» и внедрена в серийное производство на следующих моделях поршней: 21126-1004015М, 11194-1004015М, Д24023ДН.

В ходе работы были получены следующие результаты:

1. Осуществлен переход к технологическому маршруту (рис. 1 б) без усложнения оборудования.
2. Количество переходов, необходимое для обработки ПО уменьшено в 2 раза.

3. В 2 раза уменьшена номенклатура инструмента, благодаря чему, время наладки уменьшено на 30%, а общая себестоимость инструмента снижена на 35%.

4. Время обработки сокращено с 2,5 мин до 1,5 мин.

## Литература

1. Гордиенко Е.К. Определение параметров закрепления поршня ДВС в станочном приспособлении для его последующей механической обработки / Е.К. Гордиенко, А.С. Стрибуль, А.В. Белогуб // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 51-55.
2. Гордиенко Е.К. Повышение производительности и точности механической обработки боковой поверхности поршней ДВС / Е.К. Гордиенко, А.В. Белогуб // Авіаційно-космічна техніка і технологія: науково технічний журнал. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2009. – Вип. № 9 (66). – С. 32-37.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 430 с.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. Ю.А. Гусев, Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ПАЛЬЦЕВОГО ОТВОРУ ПОРШНІЮ ДВС

**Є.К. Гордієнко, О.В. Білогуб**

Розглянуто питання підвищення продуктивності механічної обробки отвору під поршневий палець в тілі поршня за рахунок зменшення часу обробки. Зменшення часу обробки запропоновано здійснити шляхом структурно-параметричних змін маршруту технологічного процесу. Концентрація операцій в запропонованому маршруті механічної обробки поршня вимагає змін або оснащення та інструменту, або верстатного обладнання. Проведено аналіз існуючого ріжучого та допоміжного інструментів, з урахуванням отриманих результатів запропонована конструкція більш досконалого інструменту, що забезпечує вимоги технологічного маршруту без ускладнення верстатного обладнання.

**Ключові слова:** продуктивність механічної обробки, пальцевий отвір, борштанга, ріжучий інструмент, розточний інструмент, технологічний маршрут.

## INCREASING THE MACHINING EFFICIENCY OF THE PIN HOLE OF THE PISTON OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**E.K. Gordienko, A.V. Belogub**

A question of improving the productivity of machining the pin hole in the body of a piston by reducing the machining time was considered. Reducing the machining time was proposed to be implemented by putting the structural and parametric changes in an operation-routing sequence. The concentration of the operations in the proposed route of the piston machining requires either fixtures and tools or equipment to be changed. The analysis of existing cutting and auxiliary tools was carried, on the basis of gotten results, a better tool design have been suggested which meets operation-routing sequence requirements without complication of fixtures.

**Key words:** machining efficiency, pin hole, boring bar, cutting tools, boring tools, operation-routing sequence

**Гордиенко Евгений Константинович** – инженер-технолог ОАО «АВТРАМАТ», Харьков, Украина, e-mail: gordienko\_ek@mail.ru.

**Белогуб Александр Витальевич** – канд. техн. наук, технический директор ОАО «АВТРАМАТ», Харьков, Украина, e-mail: a\_belogub@mail.ru.

УДК 681.518

Г.Ю. КОНЦЕВИЧ<sup>1</sup>, К.В. ЦОЙ<sup>1</sup>, В.В. НЕРУБАССКИЙ<sup>2</sup>, А.П. МАЗУРКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», Николаев, Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## СОПРОВОЖДЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ГП НПКГ «ЗОРЯ» – «МАШПРОЕКТ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА И СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Рассмотрена современная концепция повышения эксплуатационных характеристик ГТД с использованием удаленного мониторинга и системы технической диагностики. Описаны структура и основные программно-технические компоненты центра удаленного мониторинга. Приведена схема взаимодействия центра удаленного мониторинга и системы технической диагностики с использованием глобальной сети Internet. Дан перечень базовых алгоритмов, которые встроены в систему технической диагностики, с указанием используемого математического аппарата, а также некоторые особенности их программной реализации.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, эксплуатация, удаленный мониторинг, техническая диагностика, программное обеспечение системы технической диагностики.

### Введение

Разработанная концепция технической политики комплекса «Сопровождение эксплуатации и сервисное обслуживание газотурбинных двигателей ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» с использованием удаленного мониторинга и системы технической диагностики» определила основные направления создания на предприятии центра удаленного мониторинга. Указанная концепция была разработана ЦНИОКР «Машпроект» в 2005-2007 гг. совместно с ОАО «Элемент» (г. Одесса), Национальным аэрокосмическим университетом «ХАИ» (г. Харьков), фирмой «CCS» (США), при участии и методологической поддержке ИТЦ «Огртехдиагностика» ДАО «Оргэнергогаз» (ОАО «Газпром») и ЗАО «Система-Сервис» (г. С.-Петербург).

Центры удаленного мониторинга (ЦУМ) и диагностики созданы и успешно эксплуатируются ведущими зарубежными производителями газотурбинных энергетических установок, в частности – «General Electric» (г. Варингтон, Великобритания), «Mitsubishi» (г. Токашаго, Япония), «Siemens» (г. Эрлангер, Германия), «Alstom» (г. Баден, Швейцария). Эти центры, работающие в режиме 24/7/365, предлагают своим заказчикам широкий доступ к информации и техническим ресурсам, связанным с эксплуатирующимся оборудованием.

Удаленный мониторинг позволяет уменьшить расходы на поездки, минимизируя необходимость перемещения людей с места на

место с целью сбора данных (**принцип перемещения данных, а не людей**).

В структуру центра удаленного мониторинга и диагностики входит служба диагностики энергетических установок. Задачей службы диагностики энергетических установок является анализ изменения характеристик оборудования (выявление трендов) с целью повышения надежности за счет раннего обнаружения аномальных состояний, до того, как они перейдут в дорогостоящую стадию простоя.

В дополнение к этим преимуществам, сбор и мониторинг данных о ГТД предоставляет производителю двигателей ключевую информацию, которая может быть использована для улучшения характеристик ГТД и качества обслуживания. Конкретные улучшения могут включать увеличение срока службы, повышение отказоустойчивости, повышение надежности запуска, оптимизацию системы управления, продолжительности технического обслуживания и т.д. [1 – 4].

Успешная работа ЦУМ обеспечивается за счет разработки специальных инструментов (программ) мониторинга и диагностики, основанных на использовании, в том числе, методов искусственного интеллекта, позволяющих сканировать большие объемы данных для выявления наличия аномальных тенденций изменения параметров двигателя, чтобы затем предупредить специальный мониторинговый персонал о необходимости проведения более детального анализа.

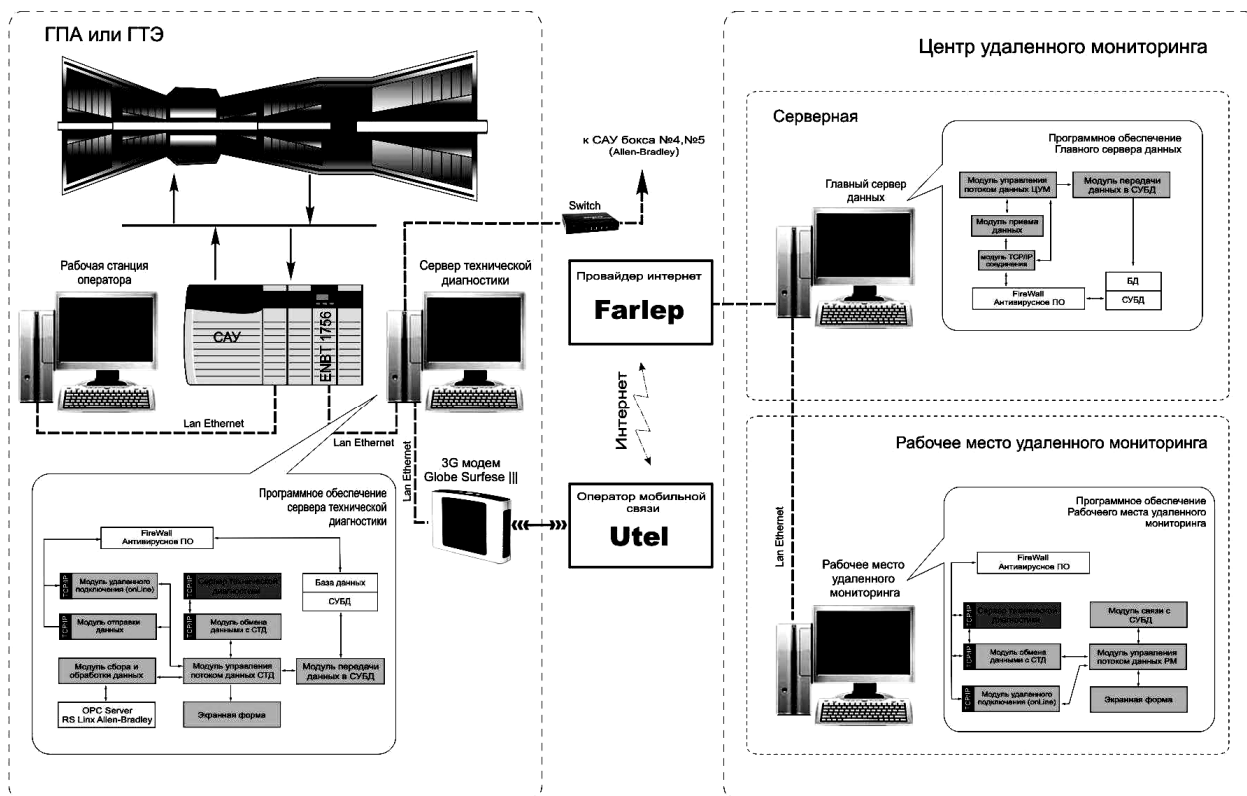


Рис. 1. Структурная схема связи диагностируемого объекта и ЦУМ с использованием сети Internet

## 1. Состав комплекса программно-технических средств

### 1.1. Технические средства

В соответствии со структурной схемой связи диагностируемого объекта и ЦУМ с использованием сети Internet (рис.1), в состав комплекса технических средств включено следующее оборудование.

Для диагностируемого объекта (газоперекачивающий агрегат или газотурбинная электростанция):

- коммуникационный модуль (выбирается в зависимости от используемых ПТС САУ). Предназначен для приема-передачи данных из САУ в модуль приема и обработки данных системы технической диагностики (СТД);
- Ethernet-коммутатор (Switch). Предназначен для построения сети передачи данных от нескольких САУ к компьютеру (серверу) СТД;
- компьютер (сервер) СТД;
- доступ в Internet с постоянным IP адресом. Возможно как кабельное высокоскоростное соединение, так и применение беспроводных технологий доступа в Internet (GSM/GPRS и EDGE, UMTS/HSDPA), с использованием 3G роутеров;

• рабочая станция диагностики (при необходимости организации удаленного места оператора-диагноста на объекте).

Для ЦУМ (ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект»):

- компьютер (сервер) СТД, имеющий выход в

сеть Интернет, с RAID-массивом жестких дисков, который предназначен для повышения надежности работы, обеспечения дублирования записываемой информации и сохранности архивов параметров. RAID-массив из шести жестких дисков по 500 Гб позволит хранить информацию о параметрах всего жизненного цикла для 10–20 двигателей;

• Ethernet-коммутатор (HUB). Предназначен для построения сети передачи данных от компьютера (сервера) СТД к компьютерам рабочих мест операторов-диагностов;

• компьютеры рабочих мест операторов-диагностов. Предназначены для осуществления анализа параметров диагностируемых ГТД, выдачи рекомендаций, мониторинга параметров двигателей в режиме on-line.

Указанное оборудование не является специализированным, имеется в свободной продаже и может быть приобретено на тендерной основе в соответствии с требованиями, сформированными по результатам разработки инженерного проекта системы удаленного мониторинга.

### 1.2. Программные средства

Программное обеспечение (ПО) системы удаленного мониторинга включает в себя следующие составляющие:

- программный модуль передачи данных от САУ к компьютеру технической диагностики;

- программный модуль обеспечения автоматической «упаковки» (сжатия) архивов параметров;
- программный модуль обеспечения автоматической «распаковки» архивов параметров;
- модуль создание архивного файла, и отправки его в центр удаленного мониторинга;
- модуль передачи данных в систему управления базами данных (СУБД);
- модуль обмена данными с СТД;
- модуль on-line подключения, для удаленного доступа в реальном времени.

ПО СУБД – стандартное. База данных (БД) предназначена для записи, хранения архивов параметров и обеспечения диагностических алгоритмов необходимой информацией. ПО обеспечивает запись данных в БД и предоставляет механизм запроса данных из БД. Привязка данного ПО осуществляется при разработке программного обеспечения передачи данных.

Для функционирования компьютера СТД требуются следующие программные средства:

- ПО системы параметрической диагностики. Данная система производит анализ параметров двигателя на предмет выявления наличия аномальных тенденций их изменения. Работа ведется со стационарными параметрами, а также с журналами запусков, выбегов, данными о наработке ГТД, в том числе, с наработкой ГТД на режиме максимальной мощности, значениями наработок на переменных режимах, данными о количестве нормальных и ускоренных пусков, количестве аварийных остановок. При наличии аномальных тенденций изменения параметров двигателя выдаются сообщения о необходимости проведения более детального анализа. Программное обеспечение СТД разработано специалистами кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета «ХАИ» (г. Харьков);

- ПО связи компьютера технической диагностики с GPRS/GSM-модемом. Стандартное ПО на базе ОС Windows, входит в комплект поставки модема;

- система удаленного доступа к компьютеру VNC версии 4.1.1 (или выше). Предназначено для обеспечения работы компьютера рабочего места оператора-диагноста. Стандартное ПО на базе ОС Windows;

- ПО прямого доступа к контроллерам САУ (OPC Server);

- ПО предотвращения несанкционированного доступа из сети Internet к ОС (FireWall). Стандартное ПО на базе ОС Windows. Привязка данного ПО осуществляется при разработке ПО передачи данных;

- антивирусное ПО.

## 2. Принцип работы удаленного мониторинга и СТД

Программное обеспечение системы удаленного мониторинга и технической диагностики устанавливаются на отдельном компьютере, который связан с САУ с помощью коммуникационного модуля. ПО удаленного мониторинга производит считывание показаний датчиков непосредственно с САУ объекта мониторинга. Далее происходит обработка данных и их распределение:

- передача данных серверу технической диагностики и прием результатов обработанных данных;
- запись данных файл бинарного типа с последующим архивированием;
- запись параметров в базу данных согласно серийному номеру двигателя;
- интерактивное представление данных.

Один раз в сутки происходит передача архивного файла в центр удаленного мониторинга, через выделенный канал связи Интернет. Система удаленного мониторинга позволяет принимать подключения в режиме реального времени и передавать весь пакет данных удаленному клиенту. Интерфейс программы представлен на рис. 2.

Программное обеспечение центра удаленного мониторинга устанавливается на специализированном сервере, который хранит информацию, поступающую со всех объектов мониторинга, согласно принятому формату. Данные принимаются в архивных файлах, после чего производится их разархивирование, обработка и запись данных в базу данных согласно серийному номеру двигателя. Данный сервер входит в локальную сеть с рабочими станциями операторов, что позволяет операторам с помощью ПО выполнять следующее:

- подключение в режиме on-line к системам удаленного мониторинга (при наличии сети Internet);
- подключение и просмотр архивов с баз данных как локально, так и удаленно;
- построение графиков с баз данных и с архивных файлов.

## 3. Особенности алгоритмического обеспечения СТД

Алгоритмическое обеспечение СТД представляет собой универсальный набор программно реализованных алгоритмов диагностирования технического состояния, а также программных и методических средств их адаптации к особенностям конкретного объекта. Ниже приведен ориентировочный состав алгоритмов:

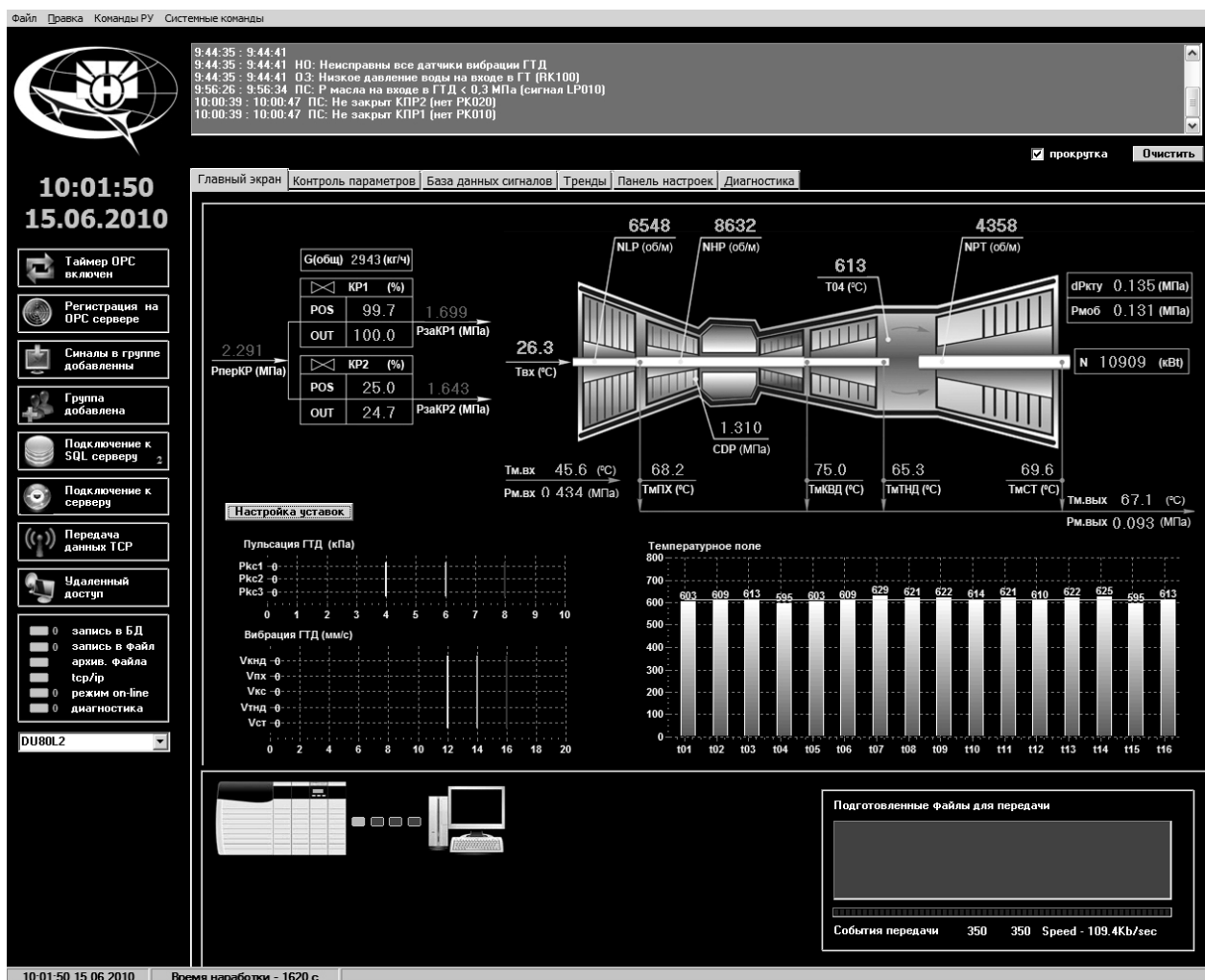


Рис. 2. Интерфейс системы удаленного мониторинга

- входной контроль и проверка кондиционности параметров ГТД;
- идентификация режима работы ГТД;
- диагностика технического состояния (ТС) ГТД по параметрам газовоздушного тракта;
- диагностика ТС ГТД по давлению в разгрузочной полости;
- диагностика ТС ГТД по параметрам топливной системы;
- диагностика ТС ГТД по вибрации и пульсации давления в камере сгорания;
- диагностика ТС ГТД по степени неравномерности температурного поля за турбиной;
- диагностика ТС ГТД по параметрам масло-системы;
- диагностика ТС ГТД по параметрам запуска или холодной прокрутки;
- диагностика ТС ГТД по параметрам останова ГТД;
- запись диагностических архивов параметров (на установившихся режимах, запусках, остановках и т.д.);

- оперативный тренд-анализ и прогнозирование параметров ГТД.

Алгоритмы СТД через модуль обмена данными обрабатывают полученную от САУ информацию и формируют диагностические параметры и сообщения. В функции алгоритмов СТД входит функция формирования информации, помещаемой в БД, или архивы, для ее последующего анализа. Результаты работы алгоритмов СТД в виде значений вычисленных параметров и отклонений контролируемых параметров от норм, а также сообщений, передаются для отображения на диагностических экранах.

Основным методом диагностирования является допусковый контроль. При этом по вычисленным базовым значениям  $Z_{\text{БАЗ}}$  рассчитываются отклонения контролируемых параметров ГТД  $\Delta Z = Z - Z_{\text{БАЗ}}$ , которые сравниваются с допустимыми — нижним  $D_{\text{Н}}$  и верхним  $D_{\text{В}}$ :

$$D_{\text{Н}} < \Delta Z < D_{\text{В}}.$$

В качестве базовых значений для расчета отклонений могут использоваться как математические модели исправного состояния, так и формулярные характеристики ГТД.

Для обнаружения тренда (т.е. статистически значимого изменения параметра) используется непараметрический  $g$ -критерий Хальда-Аббе. При наличии тренда выполняется прогнозирование с использованием регрессионных моделей с экспоненциальным сглаживанием.

В целом алгоритмы СТД имеют модульную архитектуру и, при необходимости, их состав может быть расширен. Для настройки алгоритмов и самой СТД используется универсальная БД, что обеспечивает простую адаптацию системы к любым конфигурациям ГТД и составу измеряемых параметров.

### Заключение

Описанная концепция работы системы удаленного мониторинга в составе СТД успешно реализована и тестируется в испытательном цехе ГП

НПКГ «Зоря» – «Машпроект». Запланированы эксплуатационные испытания системы удаленного мониторинга и ее коммерческое использование.

### Литература

1. Нерубасский В.В. Анализ системы запуска авиационного газотурбинного двигателя как объекта диагностирования / В.В. Нерубасский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9 (45). – С. 92-96.
2. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
3. Добрянский Г.В. Динамика авиационных ГТД / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
4. Кац Б.М. Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей / Б.М. Кац, Э.С. Жаров, В.К. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1976. – 220 с.

Поступила в редакцию 29.05.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент И.Лобода, Национальный политехнический институт, Мехико, Мексика.

### СУПРОВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА СЕРВІСНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ДП НВКГ «ЗОРЯ» – «МАШПРОЕКТ» З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ТА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

*Г.Ю. Концевич, К.В. Цой, В.В. Нерубаський, А.П. Мазурков*

Розглянута сучасна концепція підвищення експлуатаційних характеристик ГТД з використанням віддаленого моніторингу та системи технічної діагностики. Дано опис структури та основні програмно-технічні компоненти центру віддаленого моніторингу. Наведена схема взаємодії центру віддаленого моніторингу та системи технічної діагностики з використанням глобальної мережі Internet. Поданий перелік базових алгоритмів, які вбудовані в систему технічної діагностики, з посиланням на математичний апарат, а також деякі особливості їх програмної реалізації.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, експлуатація, сервісне обслуговування, віддалений моніторинг, технічна діагностика, програмне забезпечення системи технічної діагностики.

### MAINTENANCE AND TECHNICAL SERVICE OF ZORYA-MASHPROEKT TURBINE ENGINES USING REMOTE MONITORING AND TECHNICAL DIAGNOSTICS

*G.J. Kontsevich, K.V. Tsoy, V.V. Nerubaskyi, A.P. Mazurkov*

State-of-the-art concept of the turbine engine maintenance performances enhancement using remote monitoring and technical diagnostics is reported. The structure and main software-hardware components of remote monitoring centre are described. The interaction between remote monitoring centre and technical diagnostics system via Internet global networking is depicted. The list of base algorithms been integrated in technical diagnostics system with appropriate mathematical methods and some features of the software implementation are reviewed.

**Key words:** gas turbine engine, maintenance, technical service, remote monitoring, technical diagnostics, technical diagnostic system software.

**Концевич Георгий Юрьевич** – канд. техн. наук, начальник отдела систем автоматического управления ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: ykontsevich@mail.ru.

**Цой Константин Викторович** – инженер-конструктор III категории ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: TsoyKV@gmail.com.

**Нерубасский Вадим Владимирович** – старший научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Мазурков Анатолий Павлович** – старший научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

УДК 656.7: 656.022:656.08

О.М. РЕВА<sup>1</sup>, Ю.Ю. БІРЮКОВ<sup>2</sup>, В.А. ШУЛЬГІН<sup>3</sup>, С.І. КОРЖ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Кіровоградський національний технічний університет, Україна

<sup>2</sup>Львівський регіональний структурний підрозділ ДП ОПР України

<sup>3</sup>Державна льотна академія України

<sup>4</sup>Тренажерний центр навчально-сертифікаційного центру ДП ОПР України

## ПРОАКТИВНА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКТУВАННЯ ДИСПЕТЧЕРСЬКОЇ ЗМІНИ ЗА ПОКАЗНИКАМИ БЕЗПОМИЛКОВСТІ, СВОЄЧАСНОСТІ І ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ

Звичайний розгляд впливу людського чинника на безпеку функціонування ерготичної системи "екіпаж – повітряне судно – орган обслуговування повітряного руху" розповсюджено на процеси професійної діяльності невеликих груп авіаційних операторів, зокрема формування і комплектування диспетчерських змін за критеріями безпомилковості, своєчасності дій і взаємозамінності. Спираючись на показники психофізіологічної і демографічної надійності та теорему Бернуллі, проведено порівняльний аналіз математичних моделей трьох можливих форм взаємодії у зміні, що передбачають різний ступінь взаємозамінності авіадиспетчерів в процесі управління повітряним рухом. Запропоновано раціональний підхід до комплектування диспетчерської зміни, який ґрунтується на компромісі між трьома моделями.

**Ключові слова:** вплив людського чинника на безпеку польотів, показники своєчасності, безпомилковості і взаємозамінності у формуванні диспетчерської зміни як невеликої групи авіаційних операторів, формула Бернуллі, форми взаємодії у зміні.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Ще у 1940 році було уперше підраховано, що три з чотирьох авіаційних пригод (АП) відбуваються з вини людини. Причому з тих пір загальновизнано і переконливо підтверджено чисельними дослідженнями, що авіаційні оператори "переднього краю" (авіадиспетчери (А/Д), члени льотного екіпажу) є вирішальним чинником не тільки у виникненні, але ж і у подоланні АП [1 – 4 та ін.]. При цьому слід зазначити, що, як витікає з аналізу, проведеному у праці [5, 6], питанням впливу людського чинника (ЛЧ) на безпеку польотів (БП) шляхом дослідження професійної діяльності невеликих груп авіаційних операторів (екіпажів повітряних суден (ПС), диспетчерських змін), інших авіаційних колективів, що відображається взаємодією інтерфейсів "L – L" ("людина – людина") відомої концептуальної моделі "SHEL" ICAO, приділяється явно недостатньо уваги. Хоча саме через це можна було б реально розглядати групу як "колективного оператора" з системною властивістю емерджентності [7, 8], яка для невеликих груп визначається як синергія.

$$1 + 1 + \dots + 1 > K$$

кількість авіадиспетчерів у зміні K

Рис. 1. Формула синергії диспетчерської зміни

Адже дійсно, синергія – це термін, який використовується для опису стану, коли ефективність праці групи перевищує суму індивідуальних показників її членів. Загальна формула синергії для диспетчерської зміни подана на рис. 1.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На теперішній час комплектування диспетчерських змін в системі обслуговування повітряного руху (ОПР) України відбувається за рекомендаціями, затвердженими ще біля 20 років тому Міністерством цивільної авіації (ЦА) колишнього СРСР [9], які мають самий загальний характер і тільки декларують відповідні процеси. та ж сама декларація спостерігається у більш сучасному "Керівництві з психологічного забезпечення добору, підготовки і професійної діяльності льотного і диспетчерського складу цивільної авіації Російської Федерації" [10].

У працях [11, 12] узагальнені дослідження з формування невеликих груп операторів різноманітного профілю, проте вони не враховують особливостей професійної діяльності А/Д.

**Постановка завдання досліджень.** Ефективність праці будь-якого колективу операторів, які мають тісну взаємодію, зокрема диспетчерської зміни, визначається багатьма чинниками, важливішим з яких є надійність праці, тобто здатність виконувати свої професійні функції своєчасно і безпомилково.

При цьому у безпомилковості відображається, насамперед, психологічний аспект надійності праці А/Д як людини-оператора (Л-О), котрий, активно використовуючи свої знання, вміння, навички та досвід, взаємодіє фізично і інформаційно з іншими членами зміни, пультами управління повітряним рухом (УПР) і предметом праці – ПС.

Своєрідність А/Д як елемента системи "екіпаж – ПС – орган ОПР" полягає у тому, що, якщо він не виконав певну функцію, то це не завжди пов'язано з його "відмовою", що призводить до порушення працездатності. І такого роду надійність називають  $\psi$ -надійністю. Якщо помилки А/Д пов'язані з тимчасовим зниженням працездатності, обумовленої втомою, зниженням бадьорості і та ін., то йдеться про фізіологічну ( $\Phi$ ) надійність.  $\Phi$ -надійність, з одного боку, призводить до зміни  $\psi$ -надійності, а з іншого боку, - визначає витрати людської енергії, тобто ту "ціну", котрою розплачується організм за досягнення певної величини  $\psi$ -надійності. І нарешті, повне виключення А/Д зі сфери трудової діяльності внаслідок хвороби, втрати свідомості чи смерті запізнення, стресів, відсторонення від праці з-за певних порушень і т. ін. характеризується демографічною ( $\Delta$ ) надійністю [13].

У безпомилковості і своєчасності й проявляється рівень професійної підготовленості (ПП) А/Д, а також складність операцій, що ними виконуються при УПР.

Використаємо спочатку для аналізу операторської праці А/Д нескладні показники. У якості найпростішого показника  $\psi$ -надійності візьмемо звичайну статистичну імовірність  $p_{ij}$  безпомилкового виконання операції  $i$ -го типу  $j$ -им А/Д:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{ij}}, \quad (1)$$

де  $N_{ij}$  – кількість операцій  $i$ -го типу, виконаних  $j$ -им А/Д протягом визначеного проміжку часу;  $n_{ij}$  – кількість операцій, виконаних безпомилково.

На складність операцій в контексті цієї статті обмеження можна не накладати, важливо, щоби в статистиці не враховувалися різноманітні операції по змісту чи повноті [14].

У якості найпростішого показника  $\Delta$ -надійності застосуємо статистичну імовірність  $r_{ij}$  своєчасного виконання операцій  $j$ -м А/Д:

$$r_{ij} = \frac{m_{ij}}{M_{ij}}, \quad (2)$$

де  $M_{ij}$  – кількість операцій  $i$ -го типу, запланованих для виконання  $j$ -им А/Д протягом визначеного проміжку часу;  $m_{ij}$  – кількість операцій, виконаних почалося своєчасно.

У поняття показника  $r_{ij}$  звичайно вкладається

зміст готовності до праці. Для диспетчерської зміни цей показник характеризує готовність А/Д здійснювати УПР згідно встановленої технології і в умовах, до яких вони мають допуск (сертифікат).

Для  $j$ -го А/Д виробниче завдання з УПР може складатися з  $V_j$  операцій, для котрих відомі імовірності  $p_{ij}$  і  $r_{ij}$ , причому  $i$ -та операції повторюється  $d_{ij}$  разів. Тоді імовірність  $p_j$  безпомилкової праці  $j$ -го А/Д знайдемо як добуток:

$$p_j = \prod_{i=1}^{V_j} p_{ij}^{d_{ij}}. \quad (3)$$

За аналогією для імовірності готовності маємо:

$$r_j = \prod_{i=1}^{V_j} r_{ij}^{d_{ij}}. \quad (4)$$

Якщо психологічні, фізіологічні і соціологічні чинники вважати взаємозалежними, то інтегрована імовірність  $f_j$  своєчасного і безпомилкового виконання  $j$ -м А/Д своїх функцій з УПР можна визначити так:

$$f_j = p_j \cdot r_j = \prod_{i=1}^{V_j} p_{ij}^{d_{ij}} \cdot \prod_{i=1}^{V_j} r_{ij}^{d_{ij}}. \quad (5)$$

Природно, що імовірність безпечного УПР диспетчерською зміною залежить від імовірностей  $f_j$   $j=1, K$  виконавців, їх кількості у зміні  $K$ , а також від форми взаємодії і взаємозамінності усіх А/Д зміни в процесі виконання виробничого завдання.

Таким чином, **метою статті** є розробка моделі комплектування диспетчерської зміни як невеликої групи авіаційних операторів, утвореної з  $K$  А/Д, яка орієнтується на таку форму їх взаємодії, яка дає максимальну імовірність виконання ними функцій з УПР:

$$\max F(K, V_j, p_{ij}, r_{ij}, d_{ij}) \quad (6)$$

та враховує обмеження параметрів, від яких залежить інтегрований показник  $F$  надійності праці групи. При цьому, безумовно, йдеться про проактивний підхід, під яким у загальному випадку розуміється будь-яка подія, стимул або процес, які впливають на події, стимули або процеси, що відбуваються пізніше. Отже, висувається завдання *проактивного підходу до управління БП (proactive approach to safety management)* при ОПР, тобто розробку сукупності заходів і процедур з управління ризиком, асоційованим із сферою організації праці диспетчерських змін, які вживаються з метою досягнення найкращих їх діяльності.

## Порівняльний аналіз форм взаємодії авіадиспетчерів у зміні

Щоби отримати рішення задачі (6) необхідно розглянути можливі теоретичні форми взаємодії між

А/Д у зміні і вибрати найбільш ефективну.

**Форма 1.** А/Д здійснюють взаємодії один з одним згідно визначеної технології УПР, але ж їх ПП не дозволяє виконувати обов'язки іншого члена групи. І оскільки відсутня будь-яка взаємозамінність, то, природно, що надійна робота окремих А/Д – події незалежні, що дозволяє застосувати до відповідних імовірностей  $f_j$  теорему множення [15,16], згідно з якою та врахуванням виразу (5) отримуємо:

$$F_1 = \prod_{j=1}^K f_j = \prod_{j=1}^K \left( \prod_{i=1}^{V_j} p_{ij}^{d_{ij}} \cdot \prod_{i=1}^{V_j} r_{ij}^{d_{ij}} \right). \quad (7)$$

З виразу (7) витікає, що при інших рівних умовах імовірність  $F_1$  тим нижче, чим більша кількість повторень тієї ж самої операції  $d_{ij}$ , що виконується  $j$ -м А/Д. І чим більшу кількість операцій  $V_j$  має виконувати цей А/Д при УПР, тим менші імовірності  $p_{ij}$  і  $r_{ij}$ . При цьому зазначимо, що безумовний вплив на ці імовірності має також і чисельність зміни  $K$ .

Якщо врахувати, що завжди виконуються умови  $0 < p_{ij} < 1$  і  $0 < r_{ij} < 1$ , то очевидна нерівність:

$$F_1 < \min_{j \in \{1, K\}} \{p_{ij}, r_{ij}\}, \quad (8)$$

котра дозволяє зробити висновок, що включення в сильну диспетчерську зміну без взаємозамінності А/Д з недостатньою ПП, недисциплінованого і т.п. нівелює усі зусилля, час і кошти, що були витрачені на підготовку інших членів цієї групи авіаційних операторів та її попереднє формування.

Таким чином, форма взаємодії, яка не передбачає взаємозамінності, може використовуватися тільки у випадках вкрай простого процесу УПР, забезпечення якого здійснюється шляхом виконання невеликої кількості операцій без повторень і за наявності у колективі добре підготовлених фахівців.

**Форма 2.** А/Д зміни взаємодіють згідно нормативно визначеної технології УПР, причому рівень їх ПП забезпечує практично однакові показники  $\psi$ -надійності, тобто  $p_j = p = \text{const}$ , а рівень професійного відбору і виховання – практично однакові показники  $\Delta$ -надійності, тобто  $r_j = r = \text{const}$ .

Нехай усі  $K$  А/Д-членів диспетчерської зміни можуть виконувати будь-яку операцію з УПР, причому між моментом завершення попередньої операції і моментом початку наступної (для кожної пари операцій) маємо проміжок часу  $\Delta t(i, i+1) \geq 0$ , коли  $j$ -й А/Д залишається незайнятим УПР, має певний резерв часу і готовий прийти на допомогу колезі так, що для будь-якого моменту часу  $t_i$  забезпечується резерв виконавців  $0 \leq k(t_i) \leq K$ . Причому в окремих випадках передбачується незнижуваний рівень цього резерву:  $k(t_i) \geq 0$ . Така форма взаємодії передбачає наявність взаємозамінності у диспетчерській зміні.

Якщо вважати, що дії А/Д з УПР є незалежни-

ми випробуваннями, а наслідками – безпомилкова, з імовірністю  $p$ , чи помилкова, з імовірністю  $(1 - p)$ , робота, то з точки зору теорії імовірностей для наведеного випадку може бути застосованою теорема Бернуллі [15, 16]. При цьому своєчасне чи несвоєчасне виконання завдання позначимо відповідно  $r$  і  $(1 - r)$ .

Теорема Бернуллі відповідає біноміальному розподілу імовірностей для випадкової величини, під якою будемо розуміти  $j$  А/Д з  $K$ , які виконують свої функції безпомилково чи своєчасно, тобто [13,14]:

$$P_{K,j} = C_K^j \cdot p^j \cdot (1-p)^{K-j} \quad (9)$$

– для безпомилкової діяльності;

$$R_{K,j} = C_K^j \cdot r^j \cdot (1-r)^{K-j} \quad (10)$$

– для своєчасної діяльності.

Оскільки для надійної роботи диспетчерської зміни як невеликої групи авіаційних операторів необхідно, щоби кількість працюючих А/Д в момент часу  $t_i$  було не менше  $K - k(t_i)$ , то психофізіологічна надійність праці колективу буде визначатися так:

$$P_2(t_i) = \sum_{j=K-k(t_i)}^K C_K^j \cdot p^j \cdot (1-p)^{K-j}. \quad (11)$$

Аналогічно для  $\Delta$ -надійності маємо:

$$R_2(t_i) = \sum_{j=K-k(t_i)}^K C_K^j \cdot r^j \cdot (1-r)^{K-j}. \quad (12)$$

Розглянемо граничні значення імовірностей (11), (12). Нехай  $k(t_i) = 0$ . Тоді:

$$\begin{cases} P_2 = \sum_{j=b}^K C_K^j \cdot p^j \cdot (1-p)^{K-j} = p^K; \\ R_2 = r, \end{cases} \quad (13)$$

тобто, оскільки резерв у будь-якій час відсутній, то взаємозамінність не може бути реалізованою і показники надійності диспетчерської зміни мінімальні. Така форма взаємодії відрізняється від першої тільки рівним складом А/Д, які її утворюють.

Нехай  $k(t_i) = K - 1$ , тобто кількість резервних А/Д максимальна. Тоді:

$$\begin{cases} P_2(t_i) = \sum_{j=1}^K C_K^j \cdot p^j \cdot (1-p)^{K-j} = \\ = 1 - \sum_{j=0}^K C_K^j \cdot p^j \cdot (1-p)^{K-j} = 1 - (1-p)^K; \\ R_2(t_i) = 1 - (1-r)^K. \end{cases} \quad (14)$$

У зв'язку з тим, що  $0 < (p, r) < 1$ , то з виразів (13), (14) витікає такий висновок: при повній взаємозамінності зі збільшенням кількості резервних А/Д надійність роботи зміни різко зростає.

Якщо відмовитись від припущення, що  $p_j = p$ , а  $r_j = r$ , то замість (14) можна записати:

$$P_2(t_i) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - p_j); \quad (15)$$

$$R_2(t_i) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - r_j). \quad (16)$$

Таким чином, при повній взаємозамінності і максимальній кількості резервних виконавців імовірності безпомилковості і своєчасності роботи зміни завжди більше відповідних показників для самого надійного (досвідченого, найбільш підготовленого, дисциплінованого) А/Д. Що можна подати так:

$$\begin{cases} P_2 > \max_j \{p_j\}; \\ R_2 > \max_j \{r_j\}. \end{cases} \quad (17)$$

Для усіх інших випадків, коли  $0 < k(t_i) < K-1$ , ефективність резерву визначається співвідношенням  $k(t_i)/K$ . І чим воно більше, тим більшу роль грають А/Д з максимальним значеннями  $p_j$ ,  $r_j$  і меншу роль – А/Д з мінімальним значенням показників надійності.

Повна взаємозамінність і достатня кількість резервних фахівців дозволяє включати до складу зміни А/Д з невисокими показниками надійності роботи, чого неможливо позбавитись з-за неминучої зміни її складу. Статистика АП показує [1], що вони відбуваються і у тому випадку, коли при комплектуванні невеликих груп авіаційних операторів (льотних екіпажів, диспетчерських змін) не враховуються розглянуті закономірності.

**Форма 3.** А/Д взаємодіють згідно технології УПР, рівень їх ПП різний: деякі з них (старший А/Д, керівник польотів) можуть працювати і за себе, і підміняти ще одного колегу, тобто є попарна взаємозамінність або одностороння заміність.

При попарній взаємозамінності є справедливими формули (15), (16) за умови, що  $K = 2$ , тобто:

$$\begin{cases} P_3(t_i)_{1 \leftrightarrow 2} = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2); \\ R_3(t_i)_{1 \leftrightarrow 2} = 1 - (1 - r_1) \cdot (1 - r_2). \end{cases} \quad (18)$$

При односторонній взаємозамінності математична модель ускладнюється. Розглянемо імовірність безпомилкової роботи такої пари з показниками  $p_1$  і  $p_2$ , причому перший А/Д може замінити другого. Показник їх спільної надійності слід обчислювати, враховуючи, насамперед, що по відношенню до другого А/Д справедливі формули (15), (16):

$$P_3(t_i)_{1 \rightarrow 2} = 1 - (1 - p_2) \cdot (1 - p_1), \quad p_1'' = p_1. \quad (19)$$

Відповідно для пари маємо:

$$P_3(t_i)_{1 \rightarrow 2} = p_1 - [1 - (1 - p_2) \cdot (1 - p_1)]. \quad (19)$$

Визначивши поданий показник для усіх пар, можна знайти  $F_3$ , якщо вважати кожен пару А/Д, в

якій є взаємозамінність, одним виконавцем-оператором і застосувати формулу (13).

В залежності  $F_3$  від часу відображається як можливість першого А/Д працювати за другого згідно технології УПР, котра має спиратися на діаграму їх зайнятості виконанням своїх функцій, так і зміну їх надійності за рахунок несумісності. Причому під психологічною несумісністю розуміється наявність серйозних попарних протиріч, а під соціологічною – наявність протиріч між окремим А/Д і колективом, що проявляється, скажімо, у порушенні окремим А/Д прийнятих норм поведінки.

### Рациональний метод комплектування диспетчерської зміни як невеликої групи авіаційних операторів

Отже, математичний аналіз показує, що перша форма взаємодії, коли відсутня взаємозамінність між А/Д, неприйнятна для формування зміни, особливо в умовах, коли до роботи у неї залучається молодий фахівець з недостатнім досвідом праці на конкретному робочому місці. Тоді будь-яка його помилка може привести до АП.

Найбільш раціональною є друга форма взаємодії – повна взаємозамінність у зміні, проте її не завжди можна реалізувати, враховуючи кількість А/Д і різноманіття їх робочих місць. Тому найбільш прийнятною слід вважати все ж третю форму комплектування зміни. В такому випадку має бути забезпечена повна взаємозамінність щонайменше у таких діадах: "керівник польотів (КП) ↔ старший А/Д", "керівник польотів → А/Д", "старший А/Д → А/Д", "А/Д (щонайменше один на зміну з відповідним допуском) → старший А/Д", "А/Д (щонайменше один на зміну з відповідним допуском) → А/Д". Загальна схема такої взаємозамінності подана на рис. 2.

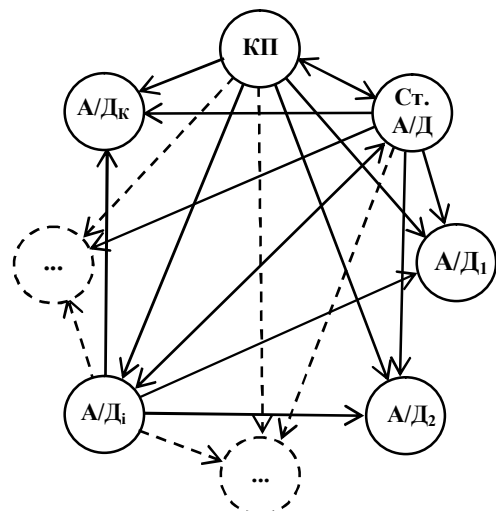


Рис. 2. Пропонована схема взаємозамінності в диспетчерській зміні

При цьому вкажемо, що забезпечення зазначеного зв'язку особливо важливо для нових змін, що утворюються.

Таким чином, при комплектуванні диспетчерської зміни необхідно підбирати фахівців, які мають суттєвий досвід на різних робочих місцях. Цей їх досвід УПР має забезпечувати обов'язкову попарну, хоча б односторонню заміність у зміні.

## Висновки

1. Потреба врахування впливу ЛЧ на безпеку функціонування ергатичної системи "екіпаж – ПС – орган ОПР" вимагає здійснення ефективних заходів з формування невеликих груп авіаційних операторів як "колективного оператора" і забезпечення режиму синергії в їх професійній діяльності.

2. Спираючись на поняття і показники психологічної, фізіологічної і демографічної надійності та теорему Бернуллі, проведено порівняльний аналіз математичних моделей трьох можливих форм взаємодії у зміні, що передбачають різний ступінь взаємозамінності А/Д в процесі УПР, а саме: повну відсутність взаємозамінності, абсолютну взаємозамінність кожного з кожним та частинну попарна взаємозамінність.

3. Запропоновано раціональний підхід до комплектування диспетчерської зміни, який ґрунтується на компромісі між трьома моделями.

4. Подальші дослідження у напрямку комплектування і формування диспетчерських змін як невеликих груп авіаційних операторів слід проводити у напрямках:

- оцінки  $\psi$ -надійності А/Д з урахуванням можливості невиконання ними в процесі УПР потрібних дій чи виконання непотрібної дії, чи неправильної послідовності дій, чи неправильного виконання потрібної дії;
- застосування методів соціоніки.

## Література

1. Изучение роли человеческого фактора при авиационных происшествиях и инцидентах // Человеческий фактор: Сборник материалов № 7. – Циркуляр ИКАО 240-AN/144. – Монреаль, Канада, 1993. – 76 с.
2. Психологические аспекты проблемы "человеческого фактора" в авиационной аварийности: анализ и стратегия профилактики / А.В. Ключев, А.Н. Качалкин, Э.Б. Диденко, В.Е. Овчаров, Н.Г. Горбач. – М.: НТЦ МАК, 1996. – 85 с.
3. Лейченко С.Д. Человеческий фактор в авиации: монография в 2-х кн. / С.Д. Лейченко, А.В. Малишевский, Н.Ф. Михайлик. – Кн. 1 – СПб.: ГУГА, 2005. – 480 с.; Кн. 2 – СПб.: ГУГА, 2006. – 512 с.

4. Рева А.Н. Человеческий фактор и безопасность полетов: (Проактивное исследование влияния): монография / А.Н. Рева, К.М. Тумышев, А.А. Бекмухамбетов; науч. ред. А.Н. Рева, К.М. Тумышев. – Алматы, 2007. – 242 с.

5. Бірюков Ю.Ю. Нормативні рекомендації щодо комплектування невеликих груп операторів та інших колективів авіаційних фахівців / Ю.Ю. Бірюков // Професійна підготовка авіаційних спеціалістів в світє сучасних потреб: м-лы міждун. науч.-практ. конф. Кировоград, 7 сент. 2006 г. – Кировоград: ДЛАУ, 2006. – С. 195-198.

6. Бірюков В.В. Загальні принципи формування невеликої групи авіаційних операторів / В.В. Бірюков // Науковий прогрес на рубежі тисячоріч – 2007: м-ли II Міжнар. науч.-практ. конф. Дніпропетровськ, 1-15 червня 2007 р. – Дніпропетровськ: наука і освіта, 2007. – Т. 7. Педагогічні науки. Психологія і соціологія. – С.51-61

7. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т.3. Эффективность технических систем / Под общ. ред В.Ф. Уткина, Ю.В. Крюкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

8. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ: учеб. пособ. / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

9. Организация работы службы движения авиапредприятия гражданской авиации. – М.: Воздуш. трансп., 1991. – 240 с.

10. Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации Российской Федерации (части 1-5) / Утв. Распоряжением Первого заместителя Министра транспорта РФ А.В. Нерадько № 57-р от 31. 10.2000 г. – М.: Воздушный транспорт, 2001. – 279 с.

11. Зигель А. Модели группового поведения в системе человек – машина (с учетом психосоциальных и производственных факторов) / Пер. с англ. Л.А. Какунина; А. Зигель, Дж. Вольф; под ред. Г.Е. Журавлева. – М.: Мир, 1973. – 262 с.

12. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек – техника / Г.П. Шибанов. – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.

13. Боднер В.А. Оператор и летательный аппарат / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.

14. Рева А.Н. Методология оценки ошибочных действий пилотов / А.Н. Рева, В.Е. Поляков // Психологические проблемы труда и подготовки авиаспециалистов гражданской авиации: межвуз. тематич. сб. науч. тр. – Л.: АГА, 1985. – С. 3-6.

15. Справочник по надежности: пер. с англ. / Под ред. Б.Р.Левина. В 3 т. Т.3. – М.: Мир, 1969. – 850 с.

16. Севастьянов В.А. Курс теории вероятностей и математической статистики / В.А. Севастьянов. – М.: Наука, 1982. – 569 с.

Надійшла до редакції 19.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри проектування авіаційних двигунів С.В. Спіфанов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ", Харків.

**ПРОАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКТОВАНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ СМЕНЫ  
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ БЕЗОШИБОЧНОСТИ,  
СВОЕВРЕМЕННОСТИ И ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ**

*А.Н. Рева, Ю.Ю. Бирюков, В.А. Шульгин, С.И. Корж*

Обычное рассмотрение влияния человеческого фактора на безопасность функционирования эргатической системы "экипаж – воздушное судно – орган обслуживания воздушного движения" распространено на процессы профессиональной деятельности малых групп авиационных операторов, в частности формирование и комплектование диспетчерских смен по критериям безошибочности, своевременности действий и взаимозаменяемости. Опираясь на показатели психофизиологической и демографической надежности и теорему Бернулли, проведен сравнительный анализ математических моделей трех возможных форм взаимодействия в смене, которые предусматривают разную степень взаимозаменяемости авиадиспетчеров в процессе управления воздушным движением. Предложен рациональный подход комплектования диспетчерской смены, построенный на компромиссе между тремя моделями.

**Ключевые слова:** влияние человеческого фактора на безопасность полетов, показатели своевременности, безошибочности и взаимозаменяемости в формировании диспетчерского изменения как небольшой группы авиационных операторов, формула Бернулли, формы взаимодействия в изменении

**PROACTIVE MODEL OF RECRUITMENT ATCO'S SHIFTS BASED ON TIMELINESS,  
INTERCHANGEABILITY AND TIMELINESS**

*A.N. Reva, Y.Y. Biryukov, V.A. Shulgin, S.I. Korzh*

Normal consideration of the human factor influence on the security operation ergonomic systems "crew - aircraft - ATCS" was extended on the processes of professional activities of small groups of aircraft operators, in particular the formation and infallibility of air traffic control shifts to the criteria of safety criterion, timeliness of action and interchangeability. Based on psycho-physiological and demographic indicators of reliability and Bernoulli's theorem, the comparative analysis of mathematical model was made of the three possible forms of interaction in the shift, which provide varying degrees of interoperability between air traffic controllers during providing ATS. There is a rational approach to manning of ATCO's shift, based on a compromise between three models.

**Key words:** Influence of the human factor on safety, timeliness, correctness and interchangeability of traffic control changes in the formation of an ATCO's shift, Bernoulli distribution.

**Рева Олексій Миколайович** – д-р техн. наук, проф.; проф. кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, e-mail: ran54@meta.ua.

**Бірюков Юрій Юрійович** – авіадиспетчер Львівського регіонального структурного підрозділу державного підприємства "Укрерорух", аспірант заочної форми навчання кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, e-mail: biryukov@lviv.farlep.net.

**Шульгин Валерій Анатолійович** – канд. техн. наук, декан факультету льотної експлуатації Державної льотної академії України, e-mail: VAShulgin@ukr.net.

**Корж Сергій Іванович** – начальник тренажерного центру Навчально-сертифікаційного центру ДП ОПР України, здобувач кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, e-mail: sekorzh@mail.ru.

УДК 629.7.03:658.562(045)

Н.С. КУЛИК, А.А. ТАМАРГАЗИН, И.И. ЛИННИК

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ФОРМАЛЬНЫХ СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Приведены результаты исследования по совершенствованию методики построения диагностических моделей современных авиационных газотурбинных двигателей, которые позволяют оценивать их работу, как на стационарных, так и на переходных режимах работы при минимизации вычислительных ресурсов. Предложенный подход обеспечивает постоянную адаптацию математического аппарата автоматизированной системы оценки технического состояния в процессе использования двигателя по назначению, что существенно упрощает принятие решений о дальнейшем эксплуатации конкретного двигателя.*

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, техническое состояние, математическая модель, достоверность информации.

### Введение

Проведение работ по разработке и созданию эффективной системы диагностирования серийных типов двигателей в условиях эксплуатации обычно начинается с анализа статистических данных о неисправностях систем и узлов конкретного типа двигателя или его прототипов, имевших место в процессе создания, доводки, летных испытаний и в процессе эксплуатации.

Такой анализ позволяет выбрать множество неисправных состояний двигателя и характерных признаков этих состояний. Исследуя эти состояния, их признаки, а также контролепригодность двигателя, разрабатывают совокупность предписаний о проведении диагностирования или алгоритм диагностирования любого из известного множества неисправных состояний. Естественно, что при разработке алгоритмов оперативного технического диагностирования в условиях эксплуатации необходимо в первую очередь рассматривать неисправные состояния, своевременное определение которых должно быть проведено с высокой вероятностью для обеспечения безопасности полетов. Для этого в настоящее время сбор информации о техническом состоянии авиационных двигателей в основном производится на основе параметров регистрируемых в полете.

Сложность и многоконтурность системы управления современным авиационным двигателем, разнообразие режимов ее работы требуют для рационального построения системы проведения всестороннего многофакторного и комплексного анализа особенностей функционирования газотурбин-

ного двигателя на всех основных эксплуатационных режимах.

Необходимость отработки динамических режимов работы двигателей, законов и логики управления в натурных эксплуатационных условиях, а также достаточно большой технический риск, связанный с доводкой, как узлов двигателя, так и узлов регулирующей аппаратуры, требуют создания инженерного математического метода, позволяющего достаточно точно и оперативно воспроизводить на компьютере все основные режимы работы двигателя с учетом особенностей управления ими.

Математическая модель, давая возможность более обоснованно планировать испытания и повышать информативность их результатов позволяет обеспечить большой экономический эффект при рациональном сочетании экспериментальных и расчетных исследований на стадии летных и стендовых испытаний при доводке двигателя.

### 1. Постановка задачи

Структура и точность математической модели определяются характером задачи, для решения которой они предназначены. Тем не менее, для сопровождения двигателя на протяжении всего его жизненного цикла, на ряду с узко специализированными моделями, как двигателя в целом, так и отдельных его систем и узлов, необходимо иметь обобщенную модель всего двигателя, которая позволяет осуществлять увязку специализированных моделей в единый комплекс и которая позволила бы оценивать необходимую степень их точности на разных этапах создания и эксплуатации авиационного двигателя.

Такую модель можно создать, если представить систем и узлы двигателя в виде структурных схем [1 – 5]. При представлении системы и узлов двигателя в виде структурной схемы каждый блок задает одну какую-либо подсистему (элемент)  $A_k$  целостной системы  $A^\Sigma$  (здесь  $k$  – индекс подсистемы). Динамика подсистемы описывается уравнениями в нормальной форме, где в качестве переменных используются переменные состояния системы, ее входные и выходные сигналы (параметры работы). При соединении  $K$  подсистем в целую систему  $A^\Sigma$  указываются: вектор входных сигналов ( $F$ ); вектор выходных сигналов ( $F^*$ ); вектор переменных состояния  $V$ . Вектор  $V$  задается как прямое произведение векторов переменных состояния  $V_k$  сепаратных подсистем  $A_k$ .

В большинстве случаев для газотурбинного двигателя можно предположить, что связи между подсистемами в  $A^\Sigma$  линейные. Тогда можно записать систему уравнений:

$$\begin{aligned} X &= EY + GF; \\ F^* &= JY + CF, \end{aligned}$$

которыми определяется составление  $A^\Sigma$  из подсистем  $A_k$ . Здесь  $E, G, J, C$  – матрицы связи. Элементы этих матриц принимают только три возможных значения:  $(+1)$  – связь положительная;  $(-1)$  – связь отрицательная;  $0$  – нет связи. Векторы

$$\begin{aligned} X &= (x_1, \dots, x_N); \\ Y &= (y_1, \dots, y_M) \end{aligned}$$

строятся, соответственно, на векторах входных и выходных сигналов сепаратных подсистем.

## 2. Решение задачи

Говоря о составных системах модели газотурбинного двигателя, условимся использовать следующие понятия:

– ориентированное множество  $A'$  систем, композиция которого образует составную систему  $A$ , будем называть составом  $A$ , а элементы этого множества – компонентами  $A$ ;

– те из компонент  $A$ , которые сами являются составными системами, назовем комплексами  $A$ ;

Тогда если  $A = A_0$  то составная система

$$A'_0 = \{A_i : i \in k_0\}$$

и общую структуру композиции  $A'_0$  в  $A_0$  будем изображать прадевром  $K(A_0) = (I, \Gamma)$  с помощью следующего сопоставления:

– корень  $0$  графа  $K(A_0)$  соответствует  $A_0$ :

$$I \supset k_0 = \Gamma 0;$$

– если  $i \in k_0$  и  $A_i$  – элемент  $A_0$ , то  $i$  – висющаяся вершина  $K(A_0)$ ;

– если  $i$  индексирует комплекс  $A_i$ , имеющий состав

$$A'_i = \{A_m : m \in k_i\},$$

то  $I \supset k_i = \Gamma i$ ; ...

Граф  $K(A_0)$  будем далее называть схемой сопоставления многокомпонентной системы  $A_0$ ;

– пусть  $\Sigma$  – множество систем, индексированных по построению  $K(A)$  вершинами из  $I$ . Назовем иерархией составной системы  $A$  верхнюю полуструктуру  $(\Sigma, \leq)$ , изоморфную множеству вершин схемы  $K(A)$  с порядком

$$(i \leq k) \equiv (i \in \Gamma^*(k)),$$

где  $\Gamma^*$  – транзитивное замыкание в  $K(A)$ ;

– введем соответствие между подмножествами  $I$  схемы  $K(A) = (I, \Gamma)$ , полагая, что:

$$(\forall i \in I) \Gamma^*(i) = \begin{cases} i & , \text{ если } \Gamma(i) = 0; \\ \Gamma(i) & , \text{ если } \Gamma(i) \neq 0. \end{cases}$$

Стратой ранга  $l = 1$  составной системы  $A$  будем называть одноэлементное множество

$$\delta_1 = \{A\},$$

а стратой ранга  $l > 1$  – множество систем:

$$\delta_l = \{A_m \in \Sigma : (\forall i)(A_i \in \delta_{l-1}) \cap (m \in \Gamma^*(i))\}.$$

Число страт (наибольший ранг страты)  $\delta_l$ , равно наибольшей из длин цепей иерархии составной системы  $A$ .

– страту наибольшего ранга называют элементарным составом  $A$ ;

– составная система  $A$ , для которой указано семейство  $\delta = (\delta_l)$ ,  $l \in L$ , страт иерархии, называется стратифицированной, а процесс построения  $\delta$ -стратификацией  $A$ .

Составные системы могут быть стратифицированы различными способами в зависимости от выбора компонентных составов комплексов страт. В том случае, когда фиксирован элементарный состав системы, ее стратификация определяется выбором схемы сопоставления  $K(A)$ ;

– рассматривая компонентный состав системы  $A'$  как страту некоторой иерархии  $A$ , будем называть множество  $A'$  соединением, представляющим  $A$ .

Введенный термин по существу равнозначен понятию ориентированного множества систем, но отличается как от понятия «связанного множества систем», в частности, свободных соединений Заде [1], так и от понятия соединения в операциональном смысле [5]. При построении модели газотурбинного двигателя будем рассматривать соединение как множество совместимых, но раздельно воспринимаемых систем, притом множество, которое вводится применительно к контексту стратификации составных систем.

Задачу стратификации при построении модели будем рассматривать в следующей постановке: пусть задано соединение, которое принято за элементный состав  $A'$  системы  $A$ , указана схема составления  $K(A)$ , требуется построить семейство страт  $\delta$  системы.

Эта задача естественным образом сводится к задаче построения для некоторого соединения  $A'_1$  такого соединения  $A'_2$ , что пару можно рассматривать в качестве двух смежных страт иерархии составной системы. Соответствие соединений  $A'_1$  и  $A'_2$  называется морфизмом соединений, который может быть строго определен для случая линейных стационарных систем, которыми хорошо описывается любое состояние авиационного двигателя.

Пусть заданы множества  $V'_i, i \in m$ , абстрактных функций времени  $T = Z^+$ :

$$V'_i = \begin{cases} X^T, & i \in m_x; \\ Y_i^T, & i \in m_y, \end{cases}$$

определяющие некоторую систему общего вида

$$A \subset \times \{V^*_i; i \in m\},$$

где  $m_x, m_y$  – множества индексов функций входа и выхода соответственно.

Предположим, что  $(\forall i) X_i, Y_i$  имеют структуру линейного пространства, а система  $A$  допускает представление тройкой линейных отображений  $F, G, H$ , действующих на пространствах  $Q, X, Y$ .  $Q$  это пространство состояний системы  $A$ ;

$$X = \sum_{i \in m_x} \oplus X_i;$$

$$Y = \sum_{i \in m_y} \oplus Y_i$$

– области значений входных и выходных процессов системы;

$$F : Q \rightarrow Q; G : X \rightarrow Q; H : Q \rightarrow Y.$$

Удобным способом записи таких систем является таблица:

$$A = \begin{array}{ccc} & Q & Y \\ Q & F & H \\ X & G & 0 \end{array} \quad (1)$$

Следуя [2], будем называть пару  $(Q, F)$  динамикой системы  $A$ . Динамика  $(Q, F)$  определяет изменение состояний под действием одиночного нулевого сигнала из  $X$ .

Морфизм динамик  $(Q_1, F_1)$  и  $(Q_2, F_2)$  есть линейное отображение  $\varphi$ :

$$Q_1 \rightarrow Q_2.$$

Морфизм систем  $\varphi: A_1 \rightarrow A_2$  ( $A_1, A_2$  задаются в форме (1)) есть морфизм динамик  $\varphi: Q_1 \rightarrow Q_2$ . При этом система  $A_2$  называется образом или моделью системы [3].

Используя результаты полученные в [2] можно доказать, что справедливы равенства:

$$(\forall t \in Z^+) H_1 F_1^t = H_2 F_2^t \varphi;$$

$$H_1 F_1^t G_1 = H_2 F_2^t G_2,$$

откуда следует совпадение полных реакций системы  $A_1$  и ее модели  $A_2$ , находящихся в начальных состояниях  $q_1(0)$  и  $q_2(0) = \varphi q_1(0)$  соответственно при любых входных воздействиях:

$$(\forall t) : y(t) = H_1 F_1^t q_1(0) + \sum_{k=0}^{t-1} H_1 F_1^{t-k-1} G_1 X(k).$$

Состояния  $q_1(0)$  и  $q_2(0)$  называются эквивалентными в пространстве состояний  $A_1$  и  $A_2$ . Аналогично состояния  $q_1(0)$  и  $q'_1(0)$  системы  $A_1$ , для которых имеет место совпадение реакций  $A_1$  при произвольных входных воздействиях, называются эквивалентными в пространстве  $Q_1$ .

При построении модели газотурбинного двигателя можно ограничиться рассмотрением только эпиморфизмов систем, т. е. будем иметь в виду модели систем, для каждого состояния которых найдется хотя бы одно эквивалентное состояние в пространстве состояний моделируемой системы и наоборот. Не имеющую эквивалентных состояний модель системы называют минимальной формой.

Примем число блоков системы  $A$  или, что для нас одно и то же, число компонент в составе  $A'$  системы  $A$  равным  $k$ , а число связей –  $m$ . Обозначим  $l$  – отрезок целых чисел,  $k = \{i : 1 \leq i \leq k\}$ ,  $n = k \cup \{0\}$ ,  $m = \{i : 1 \leq i \leq m\}$ ,  $0 \leq i \leq n$ ,  $n = k + m$ . Индексируем блоки числами из  $k$ , а связи – числами из  $m$ . Индекс 0 приписывается окружению («среде») системы  $A$ .

Введем на  $I$  унарные операции  $\rho, \pi$ , задающие инцидентность блоков и связей, полагая при этом, что:

- для любого  $i \in n$  имеется равенство  $\rho i = \pi i = i$ ;
- для любого  $i \in m$  индексами  $\rho i, \pi i$  являются числа из  $n$ , задающие индексы компонент начала и соответственно конца связи, помеченной  $i$ .

Индекс 0 полагается выделенным элементом  $I$ .

Используя эти обозначения строится схема составной системы  $A$  с помощью алгебры

$$C = (1, 0, \rho, \pi),$$

которую, обычно, называют схемой системы. Каждой дуге схемы поставим в соответствие линейное пространство. Обозначим через  $V$  семейство линейных пространств:

$$V = \{V_k; k \in m\}.$$

Каждой вершине схемы, кроме 0, поставим в соответствие абстрактную линейную систему вида (1). Обозначим семейство этих систем

$$A = \{A^m: m \in k\}$$

и будем задавать каждую  $A^m$  уравнениями стандартного вида

$$\begin{aligned} q(t+1) &= Fq(t) + Gx(t); \\ Y(t) &= Hq(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Матрицы в (2) отвечают одноименным морфизмам в (1).

Соединением систем  $A$  будем называть пару

$$A' = (E, C),$$

состоящую из двойки  $E = (A, V)$  семейств  $A = \{A^m\}$ ,  $V = \{V_k\}$  и схемы  $C = (I, 0, \rho, \pi)$ , связанных между собой условиями:

$$\begin{aligned} (\forall m \in k) X_m &= \sum_{\forall i(\pi i=m)} \oplus V_i; \\ Y_m &= \sum_{\forall i(\rho i=m)} \oplus V_i. \end{aligned}$$

### Заключение

Опыт использования предложенного подхода при создании математической модели современного авиационного двигателя показал возможность повысить достоверность его диагностирования, как на

стационарных, так и на переходных режимах работы. При этом достигалась минимизация вычислительных ресурсов, что особенно важно при построении индивидуальных систем контроля технического состояния авиационных газотурбинных двигателей.

### Литература

1. Заде Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний / Л. Заде, Ч. Дезоер. – М.: Наука, 1970. – 704 с.
2. Технология системного моделирования / Под ред. А. А. Вавилова. – Л.: ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), 1982. – 64 с.
3. Жилин Д.М. Теория систем / Д.М. Жилин. – Л.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 184 с.
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: изд-во Професси, 2003. – 752 с.
5. Алексеев В.Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных: учебник / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. – Нижний Новгород: изд-во ННГУ, 2005. – 307 с.

Поступила в редакцию 28.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры авиационных двигателей А.Г. Кучер, Национальный транспортный университет, Киев.

### СТРАТИФИЦІРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ФОРМАЛЬНИХ СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

**М.С. Кулик, О.А. Тамаргазін, І.І. Ліннік**

Наведені результати досліджень із удосконалення методики побудови діагностичних моделей сучасних авіаційних газотурбінних двигунів, які дозволяють оцінювати їх роботу, як на стаціонарних, так і на перехідних режимах роботи при мінімізації розрахункових ресурсів. Запропонований підхід забезпечує постійну адаптацію математичного апарату автоматизованої системи оцінки технічного стану в процесі використання двигуна за призначенням, що суттєво спрощує прийняття рішень про подальшу експлуатацію конкретного двигуна.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, технічний стан, математична модель, вірогідність інформації.

### THE STRATIFIED APPROACH TO CONSTRUCTION OF FORMAL STRUCTURES OF AIRCRAFT ENGINES MODELS

**N.S. Kulik, A.A. Tamargazin, I.I. Linnik**

Outcomes of research on perfection of a technique of construction of diagnostic models of modern aviation gas-turbine engines which allow to size up their activity, both on stationary, and on activity transient regimes are resulted at minimisation of computing resources. The offered approach ensures constant adaptation of a mathematical apparatus of the automated system of an estimation of an engineering condition in the course of propeller use to destination, that essentially simplifies a decision making about further maintenance of the particular propeller.

**Key words:** aircraft engine, engineering condition, mathematical model, consistency of information.

**Кулик Николай Сергеевич** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры авиационных двигателей Национального авиационного университета, Киев, Украина.

**Тамаргазин Александр Анатольевич** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры технологий аэропортов Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: avia\_ica@mail.ru..

**Линник Иван Иванович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой Института воздушного транспорта Национального авиационного университета, Киев, Украина.

УДК 621.452.001.57

**А.Н. ХУСТОЧКА, И.А. КАЛЮЖНЫЙ**

*ГП «Ивченко-Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОВАЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ АИ-450М**

*Изложен способ моделирования процессов в газотурбинном двигателе. Описан принцип построения и структура поэлементной стационарной математической модели турбовального двигателя. Для каждого из элементов модели указан способ задания его характеристики и метод, с помощью которого он экспериментально определяется. С помощью описанной математической модели был решён широкий круг инженерных задач, в их числе: расчёт дроссельных и высотно-климатической характеристик двигателя во всём эксплуатационном диапазоне температур и давлений окружающей среды, моделирование влияния на параметры двигателя перепуска воздуха за компрессором, отборы мощности от вала газогенератора, изменение проходных сечений сопловых аппаратов турбины компрессора и свободной турбины.*

**Ключевые слова:** математическая модель, характеристики узлов ТВГТД, идентификация математической модели.

### **Введение**

При создании новых газотурбинных двигателей, доводке экспериментальных и модифицировании серийных двигателей, в ГП «Ивченко-Прогресс» широко используются математические модели (ММ) ГТД. Большой опыт был накоплен при разработке ММ двигателей Д-18Т, Д-436-148, Д-27 АИ-222-25, и др. Применение ММ позволяет сократить время и затраты при проектировании и доводке двигателей, а в случае модификации серийных двигателей – обосновать возможность его модернизации [1]. В ГП «Ивченко-Прогресс» ММ также используются для создания семейств различных типов ГТД на базе газогенератора [2].

Существуют различные методы и уровни моделирования процессов ГТД. В соответствии с [3] условно выделяют следующие уровни:

- нулевой уровень – описание характеристик объекта как «черного ящика» с помощью формальных взаимосвязей;
- первый уровень – объект описан с помощью соотношений и уравнений, отражающих физические взаимосвязи между внутренними подсистемами, которые представлены нулевым уровнем;
- второй уровень – детальное моделирование взаимосвязей между подсистемами, представленными ММ первого уровня.

ММ каждого из уровней имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому выбор типа ММ зависит от перечня задач, которые предстоит решить с ее помощью. Главное – что бы ММ была максимально адек-

ватна реальному объекту. Повышение адекватности ММ может быть обеспечена тремя способами [4]:

- повышение сложности модели для более полного и точного учета различных физических явлений, определяющих рабочий процесс объекта;
- идентификация моделей по результатам измерения параметров;
- идентификация рабочей модели по результатам расчета, выполненного по более точной и сложной модели (например, с подсистемами второго уровня).

### **Результаты исследований**

Рассматриваемый турбовальный газотурбинный двигатель АИ-450М (рис. 1) разработан в ГП «Ивченко-Прогресс» и предназначен для установки на модифицированный многоцелевой вертолёт Ми-2М и лёгкий многоцелевых вертолётках

Двигатель выполнен по двухроторной схеме, включающей ротор газогенератора и ротор свободной турбины. Свободная турбина передает мощность редуктору, который установлен спереди двигателя, через вал, проходящий внутри вала ротора газогенератора. Каждый из роторов установлен на двух подшипниковых опорах, вмонтированных в статор двигателя.

Двигатель состоит из трех модулей:

- 1) редуктора с коробкой приводов агрегатов, вмонтированных в единый корпус;
- 2) газогенератора, объединяющего входное устройство, компрессор, камеру сгорания и турбину компрессора;

3) свободной турбины с ее валом.

Двигатель ТВГТД АИ-450М как объект моделирования, является сложной системой. Поэтому оптимальной ММ установившихся режимов ТВГТД для проектирования, доводки и расчета высотноклиматической характеристик (ВКХ) была выбрана

поэлементная (модульная) модель первого уровня и иерархическим построением алгоритмов. Такая модель обладает достаточно высокой информативностью, технологична при разработке, идентификации и эксплуатации. Методической основой послужили работы [3 – 8].

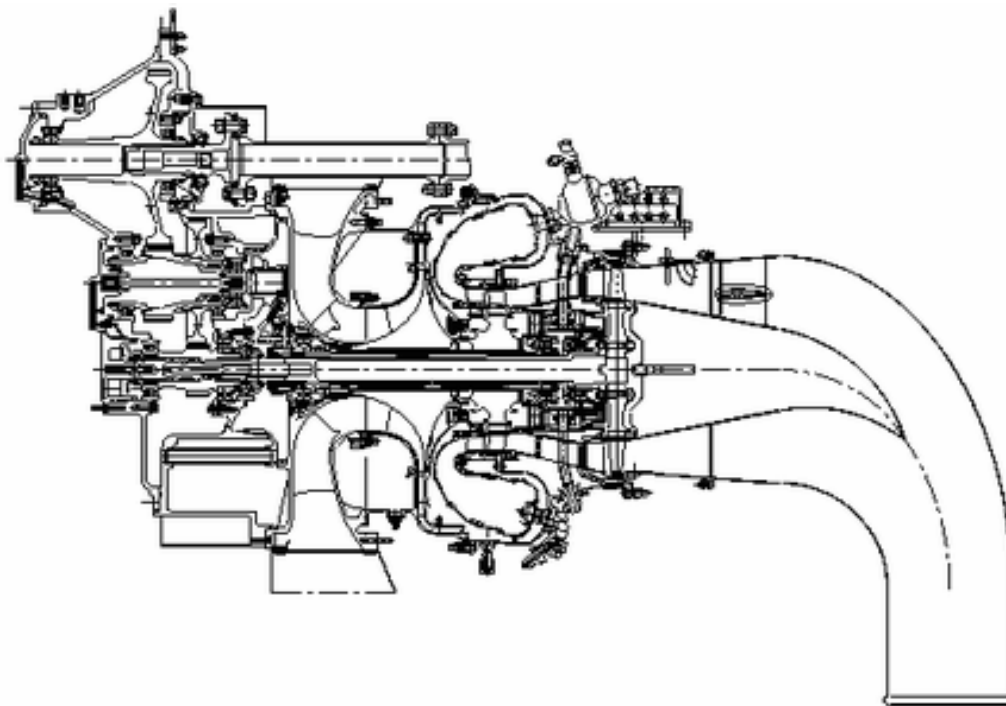


Рис. 1. Продольный разрез турбовального газотурбинного двигателя АИ-450М

В течение доводки двигателя ведутся работы по идентификации как характеристик отдельных узлов, так и характеристик двигателя в целом. Достаточно полный анализ современных методов идентификации ММ ГТД представлен в работе [9].

Математическая модель двигателя АИ-450М состоит из следующих подмодулей: входное устройство, редуктор, компрессор, камера сгорания, турбина компрессора; свободная турбина, выходное устройство, система отбора воздуха на двигательные нужды.

Основные связи между подмодулями описаны уравнениями неразрывности потока и сохранения энергии.

Термогазодинамические процессы описаны зависимостями с допущениями типичными для инженерных расчетов. [10] Термодинамические соотношения, применяемые для описания процессов в узлах двигателя представлены в ММ в зависимости свойств рабочего тела от температуры и химического состава продуктов сгорания. Балансировка ММ сводится к численному решению системы нелинейных дифференциальных уравнений методом Ньютона - Рафсона с заданной точностью. Библиотека базовых стандартных подпрограмм была разработана в ГП «Ивченко-Прогресс» в рамках САПР и со-

вершенствуется до настоящего времени. Представленная ММ ТВГТД АИ-450М реализована в виде программного продукта на языке Visual Fortran. Далее описана методология и источники определения характеристик элементов ММ.



Рис. 2. Структурная схема математической модели турбовального ГТД АИ-450М

**Характеристика входного устройства** получена в результате продувок входного устройства на стенде ГП «Ивченко-Прогресс». Представляет собой зависимость коэффициента восстановления полного давления от массового расхода воздуха.

$$\sigma_{вх} = f(G_{в пр}). \quad (1)$$

**Характеристики редуктора** заданы передаточным отношением –  $i_{ред}$  и его механическим КПД –  $\eta_{мех}$ .

**Характеристики компрессора** получены в результате испытаний газогенератора. Линия рабочих режимов была определена по результатам испытания двигателя на гидротормозном стенде. Характеристики компрессора переставляют собой зависимости:

$$G_{в пр}, \eta_k^* = f(\pi_k^*, n_k). \quad (2)$$

**Характеристики камеры сгорания (КС)** представлены в виде зависимостей:

$$\sigma_{КС} = f\left(\frac{G_{в пр} \sqrt{T_k^*}}{P_k}\right); \quad (3)$$

$$\eta_r = f\left(\frac{T_r^* - T_k^*}{T_r^*}\right). \quad (4)$$

**Характеристики турбин** представлены в виде:

$$A_t, \eta_t^* = f\left(\pi_t^*, \frac{n_t}{\sqrt{T_r^*}}\right). \quad (5)$$

Данные зависимости получены по результатам стендовых испытаний газогенератора. Расчётные характеристики проидентифицированы с полученными экспериментальными данными.

Определение характеристики свободной турбины осуществлялось экспериментально, на гидротормозном стенде, изменением загрузки гидротормоза, при неизменном режиме работы газогенератора.

**Характеристика выходного устройства** представлена в виде коэффициента скорости

$$\varphi_c = f\left(\frac{G_c \sqrt{T_c^*}}{P_c^*}\right). \quad (6)$$

**Характеристики системы отбора** воздуха от компрессора на двигательные нужды представлены схемой отборов и подводов воздуха. Двигательные нужды включают все отборы на охлаждение деталей турбины и компрессора, компенсацию осевых усилий на опорах роторов, уплотнение масляных полостей, суфлирование и утечки. Воздух, отбираемый на нужды вертолёт, входит в состав воздуха, невозвращаемого в тракт двигателя.

Основным законом управления турбовального двигателя АИ-450М двигателя является поддержание постоянной заданной физической частоты вращения свободной турбины:  $n_{СТ зад} = const$ . Управление двигателем осуществляется за счёт изменения расхода топлива, подаваемого камеру сгорания. Данный закон реализован в модуле системы автоматического управления двигателем.

Математическая модель, состоящая из перечисленных выше элементов, позволяет производить расчёты дроссельных характеристик и ВКХ двигателя во всём эксплуатационном диапазоне температур и давлений окружающей среды. С её помощью возможно моделирование влияния на параметры, как двигателя в целом, так и отдельных его узлов, перепуска воздуха за компрессором, отборы мощности от вала газогенератора, изменение проходных сечений сопловых аппаратов турбины компрессора и свободной турбины.

Благодаря использованию данной ММ были рассчитаны ВКХ двигателя АИ-450М, определены мощностные и расходные характеристики, выполнен расчёт параметров про тракту и частоты вращения ротора газогенератора, послужившие основой для прочностных расчётов. При проведении доводочных работ, ММ используется для моделирования влияния внедряемых изменений на параметры двигателя и предварительной оценки эффективности их применения.

Существующая ММ имеет потенциал для её дальнейшего совершенствования. Одним из направлений является объединение ММ турбовального двигателя с моделью несущего винта вертолёт Ми-2М и его трансмиссии в единый вычислительный комплекс. Такое объединение позволит моделировать более широкий спектр процессов в силовой установке вертолёт, а также будет являться заделом для разработки её динамической ММ. В числе других направлений совершенствования модели, ведущихся в ГП «Ивченко-Прогресс» следует отметить: применение современных методов идентификации [11].

## Литература

1. Денисюк В.М. Об'грунтування та результати модернізації двигуна АИ-25ТЛ для літака Л-39У ВПС України / В.М. Денисюк, О.М. Хусточка // 36. наук. пр. НЦ ВПС ЗСУ. – К., 2003. – Вип. 6. – С. 278-283.
2. Кравченко И.Ф. Разработка семейства ГТД на базе газогенератора двигателя АИ-222-25 / И.Ф. Кравченко, А.Н. Хусточка, В.А. Поклад, П.Д. Жеманюк // Новые рубежи Авиационной науки: международная конференция ЦАГИ. – М., 2007.

3. Дружинин Л.Н. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей: труды ЦИАМ №832 / Л.Н. Дружинин, Л.И. Швец, А.И. Ланин – М.: ЦИАМ, 1979. – С. 3-4.

4. Ахмедзянов А.М. Диагностика состояния ВРД по термогазо-динамическим параметрам / А.М. Ахмедзянов, Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 99-100.

5. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей / А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 93.

6. Математическое моделирование ГТД при проектировании и диагностике / С.В. Епифанов, А.Л. Гальченко, А.К. Бланковский, В.И. Письменный, А.Н. Хусточка // Тех. докл. Всесоюз. науч. конфер. ХАИ. – Х., 1980. – Т. 1. – С. 29-30.

7. Хусточка А.Н. Программа и методика расчета дроссельных характеристик ТРД различных схем (уровень рабочего проектирования): техн. отчет: №61/82. / А.Н. Хусточка. – Запорожье: ЗМКБ «Прогресс», 1982.

8. Муравченко О.Ф. Поэлементная математическая модель турбовинтовентиляторного дви-

гателя Д-27 / О.Ф. Муравченко, А.Н. Хусточка // Авіаційно-космічна техніка і технологія : зб. наук. пр.; М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2003. – Вып. 6. – С. 61-64.

9. Епифанов С.В. Анализ современных подходов к идентификации математических моделей ГТД / С.В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.; М-во образования и науки Украины, Нац. аерокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2001. – Вып. 23 – С. 169-174.

10. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский, В.А. Дюков, С.А. Кузьменко, Н.А. Рюмишин, А.А. Самецкий. – К.: Техника, 1998. – С. 8-18.

11. Хусточка А.Н. Способ сверки частных критериев качества идентификации математической модели ГТД / А.Н. Хусточка // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.; М-во образования и науки Украины, Нац. аерокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского. – Х., 2005. – Вып. 9. – С. 195-198.

Поступила в редакцию 12.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТУРБОВАЛЬНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА AI-450M

*О.М. Хусточка, І.А. Калюжний*

Викладено спосіб моделювання процесів у газотурбінному двигуні. Описано принцип побудови і структура поелементної стаціонарної математичної моделі турбовального двигуна. Для кожного з елементів моделі вказано спосіб завдання його характеристики і метод, за допомогою якого він експериментально визначався. За допомогою описаної математичної моделі було вирішено широке коло інженерних задач, зокрема: розрахунок дросельних і висотно-кліматичної характеристик двигуна у всьому експлуатаційному діапазоні температур і тисків навколишнього середовища, моделювання впливу на параметри двигуна перепуску повітря за компресором, відбори потужності від вала газогенератора, зміна прохідних перетинів соплових апаратів турбіни компресора і вільної турбіни.

**Ключові слова:** математична модель, характеристики вузлів ТВГТД, ідентифікація математичної моделі.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE TURBOSHAFT GAS TURBINE AI-450M

*A.N. Khustochka, I.A. Kaliuzhnyi*

The method of gas turbine processes modeling is recounted. Principles of construction and structure of the stationary elementwise mathematical model of the turboshaft engine is described. For every structural element of the model the way of defining its characteristics and the method by which it was experimentally determined are specified. Described mathematical model make it possible to solve wide range of engineering problems which include: calculation of turboshaft gas turbine throttle and altitude-climatic performance in all operational range of ambient temperatures and pressures, the modeling of changing engine parameters initiated by air bypassing, gas generator shaft power takeoff, changing gas generator turbine and free turbine nozzle throat area.

**Key words:** mathematical model, turboshaft gas turbine units performances, identification of the mathematical model.

**Хусточка Александр Николаевич** – начальник отдела ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03527@ivchenko-progress.com.

**Калюжний Иван Анатольевич** – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: Kaliuzhnyi.I@gmail.com.

УДК 621.438

А.И. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ГТД СО СВОБОДНОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) со свободной силовой турбиной, работающей на генератор в условиях электростанции. Регулирование газотурбинного двигателя осуществляет регулятор на основе управляющей ЭВМ. Проведено сравнение переходных процессов, полученных с помощью упрощенной математической модели газотурбинного двигателя, с графиками реальных (архив экспериментов) переходных процессов, полученных в условиях электростанции. Сделан вывод о графиках применения упрощенной методики и достоверности результатов, полученных с ее помощью.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, регулятор, пропорциональный алгоритм, управляющая ЭВМ, экспериментальное подтверждение.

### Введение

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) содержащий свободную силовую турбину и газогенератор (одно или двухкаскадный турбокомпрессор).

Система регулирования ГТД имеет датчики скорости вращения силовой турбины, скорости вращения контуров турбокомпрессора и датчик активной мощности генератора. Считается, что система регулирования обрабатывает сигналы этих датчиков корректно и с достаточной скоростью.

### 1. Формулирование проблемы

Требуется получить и экспериментально подтвердить упрощенную математическую модель газотурбинного двигателя со свободной силовой турбиной. Под упрощенной математической моделью понимается совокупность дифференциальных уравнений движения газотурбинного двигателя с учетом применяемых алгоритмов регулирования, для реализации которой на ЭВМ требуется минимальное количество исходных данных.

В статье [1] изложена упрощенная математическая модель газотурбинного двигателя. Настоящая статья посвящена сравнению этой модели для случая пропорционального регулирования с экспериментом.

### 2. Решение проблемы

Опишем математическую модель согласно [1].

$$\begin{cases} \dot{\bar{n}}_K T_K = \bar{h} (2 \bar{n}_K - \bar{n}_K^2) - \bar{n}_K^2; \\ \dot{\bar{n}}_G T_G = (\bar{n}_K - \bar{n}_{KX}) (2 \bar{n}_G - \bar{n}_G^2), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{n}_K$  – относительная скорость турбокомпрессора;

$\bar{n}_G$  – относительная скорость генератора;  $\bar{n}_{KX}$  – относительная скорость турбокомпрессора, соответствующая холостому ходу генератора;  $\bar{h}$  – относительный расход топлива;  $T_K$  – постоянная времени турбокомпрессора;  $T_G$  – постоянная времени генератора.

Исходными данными для математической модели ГТД являются – постоянные времени  $T_K$  и  $T_G$ , а также скорость турбокомпрессора на холостом ходу –  $\bar{n}_{KX}$ .

Топливоподача  $\bar{h}$  формируется регулятором по следующему алгоритму:

$$\bar{h} = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{n}_G \leq \bar{n}_Z - \Delta; \\ \frac{\bar{n}_Z - \bar{n}_G}{\Delta} (1 - \bar{h}_X) + \bar{h}_X & \text{при } \bar{n}_Z > \bar{n}_G > \bar{n}_Z - \Delta; \\ \bar{h}_X & \text{при } \bar{n}_G > \bar{n}_Z, \end{cases}$$

где  $\bar{n}_Z$  – заданная относительная скорость генера-

тора;  $\Delta$  – статизм регулятора;  $\bar{h}_X = \frac{\bar{n}_{KX}}{\bar{n} (2 - \bar{n}_{KX})}$  –

относительная топливоподача, соответствующая холостому ходу генератора;

Уравнения (1) получены из условия, что момент, потребляемый компрессором, пропорционален квадрату угловой скорости, а момент, развиваемый турбиной, аппроксимирован параболой с максимумом на номинальной скорости ее вращения.

Считается, что мощность газотурбинного двигателя пропорциональна скорости вращения газогенератора (в случае двухкаскадного турбо-

компрессора это скорость вращения контура высокого давления).

Система уравнений (1) решается численным методом Хемминга на ЭВМ. Решения получены в виде графиков, которые сравниваются с экспериментальными.

Рассмотрим случай аварийного останова на мощности 9 МВт (рис. 1, 2).

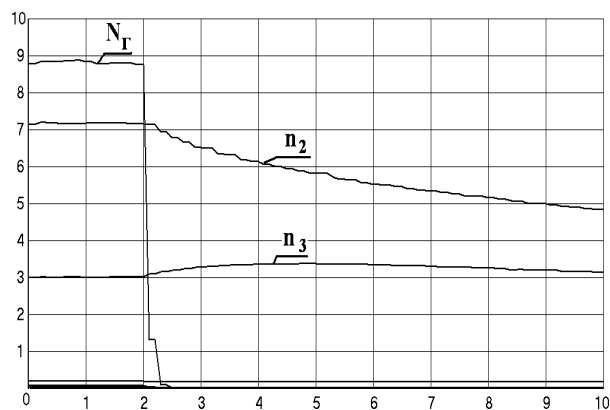


Рис. 1. Переходный процесс при аварийном останове на мощности 9 МВт, полученный экспериментально:

$n_2$  — скорость вращения турбокомпрессора;

$n_3$  — скорость вращения генератора;

$N_g$  — мощность генератора

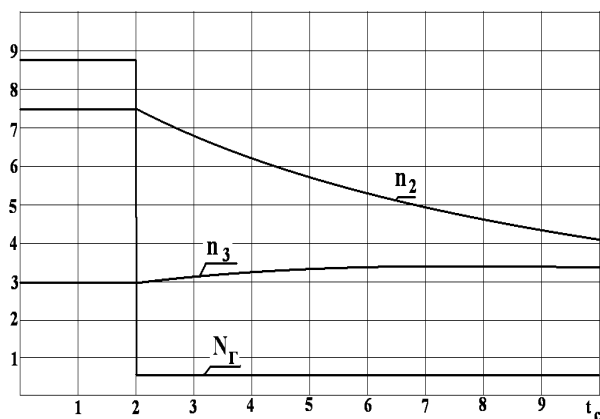


Рис. 2. Переходный процесс при аварийном останове на мощности 9 МВт, полученный расчетом на ЭВМ:

$n_2$  — скорость вращения турбокомпрессора;

$n_3$  — скорость вращения генератора;

$N_g$  — мощность генератора

Для случая сброса нагрузки важными являются величины постоянных времени. Если их определить с помощью графика рис. 1, они будут завышены. Этот случай соответствует рис. 3.

Рис. 4 и 5 показывают хорошее совпадение при существенном сбросе мощности. При их анализе следует учитывать, что положение дозатора не равно топливоподаче и ограничения.

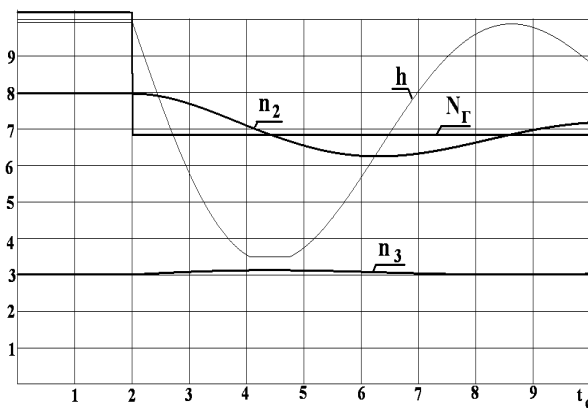


Рис. 3. Переходный процесс при сбросе мощности с 10,4 до 6,8 МВт, полученный расчетом на ЭВМ:

$n_2$  — скорость вращения турбокомпрессора;  $n_3$  —

скорость вращения генератора;  $N_g$  — мощность генератора;  $h$  — относительная топливоподача

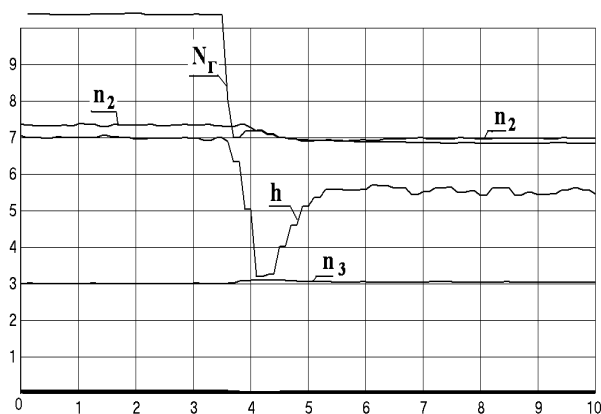


Рис. 4. Переходный процесс при сбросе мощности с 10,4 до 6,8 МВт, полученный экспериментально:

$n_2$  — скорость вращения турбокомпрессора;  $n_3$  —

скорость вращения генератора;  $N_g$  — мощность генератора;  $h$  — положение дозатора в процентах

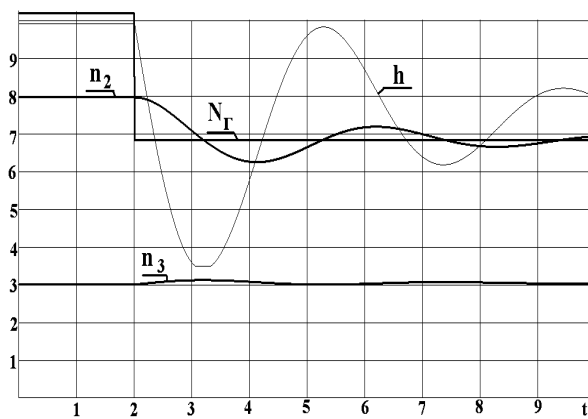


Рис. 5. Переходный процесс при сбросе мощности с 10,4 до 6,8 МВт, полученный расчетом на ЭВМ:

$n_2$  — скорость вращения турбокомпрессора;  $n_3$  —

скорость вращения генератора;  $N_g$  — мощность генератора;  $h$  — относительная топливоподача

## Заклучение

Сравнительный анализ графиков рис. 1 и рис. 2, а также рис. 3 и рис. 4, 5 показывает возможность применения предложенной математической модели для анализа переходных процессов, выбора и отладки алгоритмов регулирования. Устойчивость реальных процессов лучше расчетных.

## Литература

1. Тарасенко А.И. Переходные процессы в ГТД со свободной силовой турбиной при двухимпульсном регулировании / А.И. Тарасенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 10 (67). – С. 94-97.

Поступила в редакцию 21.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

## ДОСЛІДНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ГТД З ВІЛЬНОЮ СИЛОВОЮ ТУРБІНОЮ

*О.І. Тарасенко*

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД) з вільною силовою турбіною, яка працює на генератор в умовах електростанції. Регулювання газотурбінного двигуна здійснюється за допомогою регулятора на базі керуючої ЕОМ. Наведено порівняння перехідних процесів, одержаних за допомогою спрощеної математичної моделі газотурбінного двигуна, з графіками реальних (архів експериментів) перехідних процесів, отриманих в умовах електростанції. Зроблено висновок о межах застосування спрощеної методики і достовірності результатів, отриманих за її допомогою.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, регулятор, пропорційний алгоритм, керуюча ЕОМ, дослідне підтвердження.

## TRANSITIONAL PROCESS IN THE GTE WITH FREE POWER TURBINE BY DOUBLE-PULSE REGULATION

*A.I. Tarasenko*

Gas-turbine engine (GTE) with free power turbine, working on generator in the condition of electric power station is viewed. Regulation of gas-turbine engine realized by double-pulse regulator based on computer. That regulator is measuring speeds of rotation of contours of gas-turbine engine and make measuring of active power that generator produce. We offer a reductive mathematical model of gas-turbine engine, that allow to create an algorithm of regulation and simulate transition process in gas-turbine engine.

**Key words:** Gas-turbine engine (GTE), regulator, proportional algorithm, control computer, experimental demonstration.

**Тарасенко Александр Иванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования машин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.

УДК 629.179.13

М.В. ШЕВЧЕНКО, С.В. ЕПИФАНОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РИДЖ-ОЦЕНИВАНИЯ

*Рассмотрена проблема оценки отклонений неизмеряемых параметров ГТД путем статистического анализа отклонения измеряемых параметров в условиях изменения технического состояния двигателя и недостатка информации об этом изменении, обусловленном ограниченными возможностями измерительной системы. Рассмотрены известные методы решения исследуемой проблемы, их достоинства и недостатки. Проведен дисперсионный анализ и выявлена мультиколлинеарность элементов матрицы плана поставленной задачи. Для решения проблемы рассмотрена процедура с использованием «следа гребня» (ridge trace), позволяющая получить устойчивые оценки в классе смещенных оценок. С помощью нелинейной поузловой модели исследуемого объекта были смоделированы дефекты проточной части и получены оценки отклонения исследуемого параметра с применением простейшей итерационной процедуры ridge-оценивания. Определены погрешности оценивания.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, диагностирование, тяга, корреляция, мультиколлинеарность, статистическая оценка, ридж-оценка.

### Введение

Современные стратегии эксплуатации газотурбинных силовых установок основываются на техническом обслуживании и управлении ими по техническому состоянию. Для успешной реализации этих задач необходима информация о текущем техническом состоянии. Для полного представления о причинах и характере изменения технического состояния двигателя, необходимо построить характеристики узлов. Для этого необходимо знать полную температуру, полное и статическое давление на входе и выходе из каждого узла, и, в случае компрессора и турбины, частоту вращения ротора. На практике большая часть этой информации недоступна. Помимо недостатка информации, как правило, наблюдается шум и отклонения показаний датчиков, связанные с их погрешностями.

Поэтому при определении технического состояния двигателей прежде всего контролируются интегральные параметры. Для турбореактивных двигателей таковыми являются тяга и удельный расход топлива, однако в полете непосредственно не измеряются.

Известно несколько методов, позволяющих при диагностировании двигателя преодолеть проблему недостатка измерений. В [7] описывается многорежимный подход, суть которого заключается в использовании результатов измерения параметров двигателя на нескольких режимах его работы и получении недостающей информации из дополнительных рабочих точек. Такой подход лишь немного увеличивает точность обычного МНК, так как матрица коэффициентов

влияния по режимам меняется незначительно. В [8] объясняется, что многорежимный подход основывается на допущении постоянства относительных отклонений параметров состояния. Нарушение этого допущения может привести к существенным погрешностям оценивания. В [8] предлагается также метод, основанный на рассмотрении отклонений параметров в одной и той же рабочей точке, описанной разными признаками состояния. Такой метод устраняет недостаток многорежимного подхода, но не улучшает существенно точность оценок. Достаточно популярное в настоящее время направление в области диагностики ГТД – нейронные сети. Нейронную сеть можно обучать в процессе работы двигателя, и она будет настраиваться с учетом изменения технического состояния объекта, причем она может работать с зашумленными данными. Но для обучения нейросетевой модели необходимо или измерять моделируемый параметр, или иметь информацию о его связи с измеряемыми параметрами. Однако эта связь зависит от того, какие именно изменения происходят в узлах при изменении технического состояния двигателя. Поэтому метод нейронных сетей не решает проблему определения неизмеряемых параметров в условиях изменения технического состояния. В [9] отмечено, что для мониторинга технического состояния с целью определения постепенной деградации двигателя широко используется алгоритм «фильтр Калмана», который дает высокую точность. В этой же работе предлагается в дополнении к фильтру Калмана применять проверку по обобщенному коэффициенту вероятности с целью обнаружения внезапных отказов. Но из материалов работы видно, что авторы выполня-

ют диагностику по шести параметрам состояния при семи измерениях, то есть в условиях избытка информации. А значит, подобный алгоритм не решает проблему недостатка информации. В [10] авторы предлагают разбивать статически неопределимую задачу (когда измерений меньше, чем искомым параметров) на две подзадачи: первая – количество измерений равно количеству неизвестных, вторая – остаток неизвестных гораздо меньше количества измерений. Затем применяется метод наименьших квадратов (МНК) и выбирается комбинация, которая ближе всего отражает объект. В работе нет данных о работоспособности метода в условиях изменения характеристик (возможно, при изменении характеристик более подходящим окажется иная комбинация данных, чем в исходном состоянии).

Итак, проблема разработки алгоритмов для определения неизмеряемых параметров двигателей в настоящее время не решена и требует дальнейших исследований.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим зависимость некоторой случайной величины  $y$  (последовательность ее значений  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ) от независимых признаков  $x_1, x_2, \dots, x_m$ :

$$y_t = \alpha_1 \cdot x_{t1} + \alpha_2 \cdot x_{t2} + \dots + \alpha_m \cdot x_{tm} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $t = 1, \dots, n$  – номер наблюдения;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  – параметры, которые необходимо оценить;  $\varepsilon_t$  – случайное отклонение. Уравнение (1) в дальнейшем будем называть регрессией [1]. Анализ уравнения (1) и методика определения параметров становятся более наглядными, а расчетные процедуры существенно упрощаются, если воспользоваться матричной записью уравнения (1):

$$\tilde{Y} = X \cdot \tilde{\beta} + \tilde{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\tilde{Y}$  – вектор зависимой переменной размерности  $(n \times 1)$ ,  $X$  – матрица независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_m$  размерностью  $(n \times m)$ ;  $\tilde{\beta}$  – подлежащий оцениванию вектор неизвестных параметров размерности  $(m \times 1)$ ;  $\tilde{\varepsilon}$  – вектор случайных отклонений (возмущений) размерности  $(n \times 1)$  [1].

Регрессионная модель, рассматриваемая в данной статье, имеет вид

$$\delta \tilde{Y} = H \cdot \delta \tilde{\theta}, \quad (3)$$

где  $\delta \tilde{Y}$  – относительные отклонения термогазодинамических параметров – признаков состояния (температуры, давления, частоты вращения роторов, расход топлива и др.) от их значений в исправном состоянии;

$\delta \tilde{\theta}$  – малые относительные отклонения параметров технического состояния (внутренние коэф-

фициенты нелинейной поузловой модели, характеризующие степени развития неисправностей, позволяющие смещать характеристики узлов в различных направлениях и имитировать тем самым неисправности этих узлов – отклонения КПД узла, расхода проходящего через него рабочего тела, коэффициента восстановления полного давления, степени повышения (понижения) давления);

$H$  – матрица коэффициентов влияния (МКВ), каждый элемент которой описывает линейную зависимость между соответствующим отклонением параметра технического состояния и соответствующим признаком состояния.

МКВ формируется из нелинейной поузловой модели в результате моделирования дефектов путем задания коэффициентов  $\delta \theta$ .

Примером не измеряемого, но важного для оценки технического состояния двигателя параметра является тяга. Отклонение дроссельной характеристики для тяги от исходной является признаком изменения технического состояния двигателя. Оно является результатом комплексного изменения параметров проточной части. В данной работе предлагается выполнить анализ влияния изменения технического состояния газотурбинного двигателя на изменение его параметров и на примере тяги предложить алгоритм определения ее значения.

В работе [5] представлен обзор способов измерения тяги, и показано, что ни один из этих способов не способен учитывать изменение тяги с изменением технического состояния силовой установки в процессе эксплуатации.

В данной статье исследуются особенности применения регрессионного анализа для определения изменения тяги трехвального турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) типа Д-436-Т1. При этом изменение технического состояния описывается тринадцатью параметрами, а признаки состояния контролируются пятью датчиками. Также необходимо определить область применимости, достоинства и недостатки выбранного метода.

Так как количество параметров технического состояния ГТД больше количества измеряемых параметров ( $\text{rank}(H) < m$ ), применение регрессионного анализа в классическом виде невозможно из-за невыполнения одного из предположений, на которых он базируется [1]. Следовательно, при оценивании тяги ГТД по штатно измеряемым параметрам при изменении технического состояния необходимо выбрать метод регрессионного анализа, который способен давать решения при любом значении ранга МКВ.

В качестве исходной информации об объекте исследования использована нелинейная поузловая модель рабочего процесса трехвального ТРДД.

## 2. Решение поставленной задачи

### 2.1. Анализ исходных данных

МКВ отклонений параметров технического состояния исследуемого объекта на измеряемые параметры его проточной части и тягу представлена в табл. 1. Используются следующие обозначения: ВХ – входное устройство, КВД – компрессор высокого давления, ТВД – турбина высокого давления, ТСД – турбина среднего давления, ТВ – турбина вентилятора, КС – камера сгорания, ПЕР – переходной канал между турбиной высокого и низкого давления,  $P_{квд}$  – давление за компрессором,  $T_t$  – температура за турбиной,  $n_{нд}$ ,  $n_{сд}$ ,  $n_{вд}$  – частота вращения роторов соответственно низкого, среднего и высокого давления,  $P_{сум}$  – суммарная тяга двигателя,  $\sigma$  – коэффициент восстановления полного давления,  $\pi$  – отношение полных давлений на выходе и на входе в узел,  $G$  – расход воздуха в одном из каскадов компрессора,  $A$  – расход воздуха в одном из каскадов турбины,  $\eta$  – КПД узла,  $\eta_r$  – коэффициент полноты сгорания,  $\delta$  – малое отклонение соответствующего параметра.

Контролируемый параметр (тягу) обозначим  $P$ , вектор коэффициентов влияния отклонений параметров технического состояния на тягу –  $\vec{C}$ . Таким образом, получаем систему уравнений, решение которой относительно  $\delta\vec{\theta}$  является решением поставленной задачи:

$$\begin{cases} \delta\vec{Y} = H \cdot \delta\vec{\theta}; \\ \delta P = \vec{C}' \cdot \delta\vec{\theta}. \end{cases} \quad (4)$$

Т.к. матрица  $H$  не квадратная и с ней невозможно провести процедуру инверсии, система не имеет единственного решения (неизвестных параметров в такой системе больше, чем уравнений). В подобном случае применяется процедура так называемой псевдоинверсии, суть которой заключается в применении к уравнению регрессии МНК. В результате получаем вектор  $\delta\vec{\theta}$  оценок параметров:

$$\delta\vec{\theta} = (H' \times H)^{-1} \times H' \times d\vec{Y}. \quad (5)$$

Дальнейшие расчеты выполнены с помощью специально написанной нами на языке программирования Visual C++ программы.

Определитель матрицы плана:

$$\det(H' \cdot H) = 0 \quad (6)$$

Очевидно, что определитель вырожденной матрицы равен нулю. Вырожденность матрицы плана говорит о возможной мультиколлинеарности (под мультиколлинеарностью понимаем сопряженность независимых переменных) [1]. Характеристические числа  $\lambda_i$  матрицы плана имеют следующие значения:  $\lambda = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.2086, 0.5603, 1.4248, 2.5241, 8.3292)$ .

Геометрическим местом точек, составляющих доверительное множество в случае применения линейной модели и квадратичного критерия оценивания, является область, ограниченная эллипсоидом [1]. Как видно, первые 8 значений  $\lambda$  равны 0, что отражает взаимную сопряженность параметров, входящих в исследуемую регрессионную модель. Поэтому некоторые оси указанного эллипсоида имеют бесконечную длину.

Из анализа матрицы сопряженности видно, что степень сопряженности параметров модели очень высока. Максимальная парная сопряженность равна 0.99779, следующая за ней 0.99638 и затем 0.98872.

Из представленных данных ясно, что для решения поставленной задачи подход, предусматривающий применение классической регрессии, неприменим, так как, помимо большого разброса ошибок оценок, из-за имеющей место мультиколлинеарности оценка МНК неустойчива, то есть небольшие изменения исходной информации приводят к значительным изменениям оценок.

### 2.2. Метод гребневой (ридж) регрессии

Применим к приведенным выше данным процедуру ридж-оценивания. Процедура с использованием т.н. следа гребня (ridge trace) была впервые предложена Херлом в 1962 г. Она предназначена для «плохо обусловленных» ситуаций, когда имеются значительные корреляции между разными параметрами, входящими в модель, вследствие чего матрица  $H' \cdot H$  становится почти вырожденной, а оценки параметров – неустойчивыми (могут иметь, например, неправильный знак, а их значения могут выходить за пределы, обусловленные физическими представлениями).

Таблица 1

МКВ отклонений параметров технического состояния исследуемого объекта на измеряемые параметры его проточной части и тягу

|                  | $\delta\sigma_{вх}$ | $\delta\pi_{квд}$ | $\delta G_{квд пр}$ | $\delta\eta_{квд}$ | $\delta A_{твд}$ | $\delta\eta_{твд}$ | $\delta A_{тсд}$ | $\delta\eta_{тсд}$ | $\delta A_{тв}$ | $\delta\eta_{тв}$ | $\delta\sigma_{кс}$ | $\delta\eta_r$ | $\delta\sigma_{пер}$ |
|------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| $\delta P_{квд}$ | 0.3471              | 0.0367            | -0.0689             | 0.5569             | -1.1427          | 0.8204             | -0.0482          | 0.6552             | 0.7038          | 0.0340            | -0.4288             | 0.7208         | 0.8315               |
| $\delta T_t$     | -0.3813             | -0.0378           | 0.0710              | -0.5782            | 0.0455           | -0.7405            | 0.0493           | -0.5961            | -0.4354         | -0.2948           | -0.5969             | 0.2126         | -0.6220              |
| $\delta n_{нд}$  | -0.0622             | 0.0161            | -0.0302             | 0.2437             | -0.0156          | 0.3064             | -0.0224          | 0.2488             | 0.0380          | 0.3112            | 0.2516              | 0.3827         | 0.2581               |
| $\delta n_{сд}$  | -0.3377             | 0.0210            | -0.0400             | 0.3281             | -0.0230          | 0.4247             | -0.3626          | 0.6380             | 0.7718          | -0.0889           | 0.3396              | 0.3036         | 0.3520               |
| $\delta n_{вд}$  | -0.1690             | -0.0611           | -0.6473             | 0.6812             | -0.1726          | 0.8574             | 0.8754           | -0.1288            | -0.1237         | -0.0043           | 0.5740              | 0.1597         | 0.7365               |
| $\delta P_{сум}$ | 1.8475              | 0.0358            | -0.0674             | 0.5449             | -0.0350          | 0.6858             | -0.0506          | 0.5572             | 0.2064          | 0.5389            | 0.5624              | 0.9212         | 0.5771               |

Метод гребневой регрессии в его простейшей форме состоит в следующем. Пусть  $\mathbf{Z}$  представляет собой подходящим образом центрированную и нормированную матрицу  $\mathbf{H}$  и состоит из  $g$  столбцов  $Z_1, Z_2, \dots, Z_g$ . Тогда оценки параметров  $\delta\bar{\theta}$  можно получить по формуле [4]:

$$\delta\bar{\theta}(\alpha) = (Z'Z + \alpha \cdot I)^{-1} \cdot Z' \cdot \delta\bar{Y}; \quad (7)$$

где  $I$  – единичная матрица такой же размерности, как  $Z'Z$ ;  $\alpha$  – положительное число (обычно лежит в интервале  $(0,1)$ ).

Основной проблемой формирования алгоритма ридж-оценивания для решения практических задач является выбор значения параметра  $\alpha$ . Один из подходов к решению этой проблемы основан на построении и исследовании графика зависимости  $\delta\bar{\theta}_j(\alpha)$  от  $\alpha$  для  $j = 1, 2, \dots, g$ . Такой график называется следом гребня (ridge trace). Его вид определяется тем, что по мере увеличения параметра  $\alpha$  оценки уменьшаются и стремятся к нулю, когда  $\alpha$  стремится к бесконечности. Затем выбирается определенная величина  $\alpha$ , значение которой является компромиссным. После того, как значение  $\alpha$  выбрано, величины  $\delta\bar{\theta}_j(\alpha)$  используются в конечном варианте регрессионного уравнения. Результатом решения такого уравнения являются оценки, которые не являются оценками метода наименьших квадратов, имеют смещение, но оказываются более устойчивыми в указанном выше смысле. Они приводят к более низкому значению полного среднего квадрата ошибки, поскольку вызванное ими уменьшение разброса ошибок будет больше того, которое нужно для компенсации введенного смещения. Другими словами, погрешность, вносимая при смещении оценок, меньше, чем погрешность, вызываемая разбросом ошибок в классе несмещенных оценок. Однако Н. Дрейпер и Г. Смит [4] рекомендуют относиться к гребневым оценкам и к выбору  $\alpha$  с определенной осторожностью, поясняя «...Гребневая регрессия не есть панацея от всех бед. Это обычное решение задачи МНК-оценивания при наличии некоторой дополнительной информации о параметрах. Если дополнительная информация разумная и не противоречит имеющимся данным, то гребневая регрессия оправдана».

### 2.3. Применение гребневой регрессии к оцениванию параметров ГТД

Рассмотрим случай засорения компрессора. Моделируем его с помощью нелинейной модели, смещаая характеристику компрессора влево и вниз по  $\pi_{квд}$  и по КПД. Для этого задаем

$$\delta\pi_{квд} = -0.01, \delta G_{квд пр.} = -0.02, \delta\eta_{квд} = -0.02.$$

При этом признаки состояния изменяются следующим образом:

$$\delta P_{квд} = -0.0102, \delta T_{г} = 0.0106, \delta n_{нд} = -0.0044, \\ \delta n_{сд} = -0.0062, \delta n_{вд} = 0.0007, \delta P_{мод} = -0.00992.$$

Варьируя значения  $\alpha$  от 0 (случай обычного МНК) до 1, строим график – след гребня (рис. 1). Как видно из графика, при  $\alpha > 2 \cdot 10^{-7}$  оценки коэффициентов регрессионной модели стабилизируются.

Приблизительно оценив значение  $\alpha$ , принимаем начальное его значение, равное  $2 \cdot 10^{-7}$ . Затем определяем величину этого коэффициента более точно в соответствии с методом, предложенном Херлом, Кеннардом и Болдуином [4]. Они предложили выбирать эту величину согласно формуле

$$\alpha = \frac{g \cdot s^2}{\{\delta\bar{\theta}_z(\alpha)\}' \cdot \{\delta\bar{\theta}_z(\alpha)\}}, \quad (8)$$

где  $g$  – число параметров модели;  $s^2$  – остаточный средний квадрат, входящий в таблицу дисперсионного анализа;  $\delta\bar{\theta}_z(\alpha)$  – оценки при  $\alpha$  на предыдущей итерации.

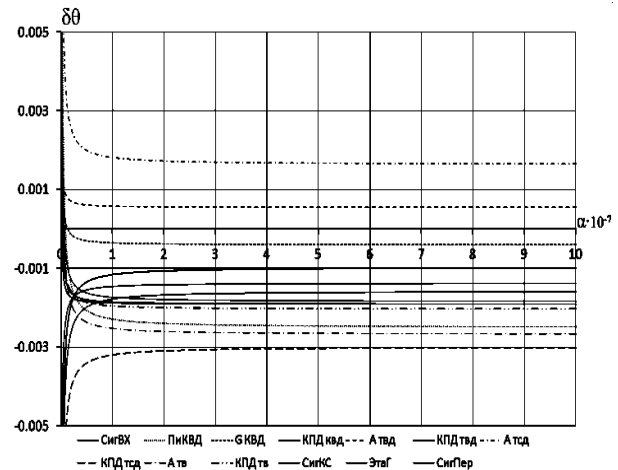


Рис. 1. След гребня

След гребня для абсолютного значения тяги представлен на рис. 2.

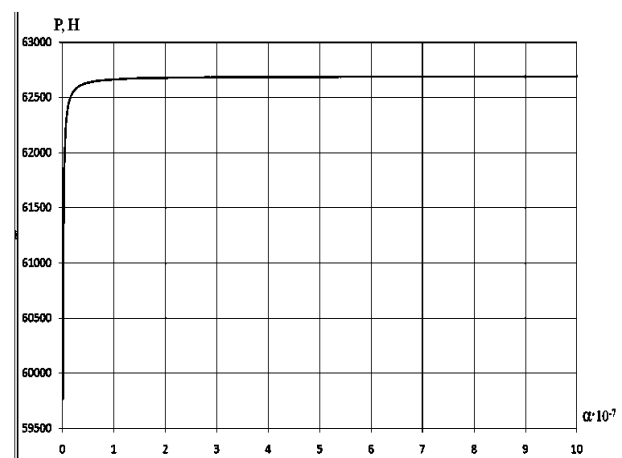
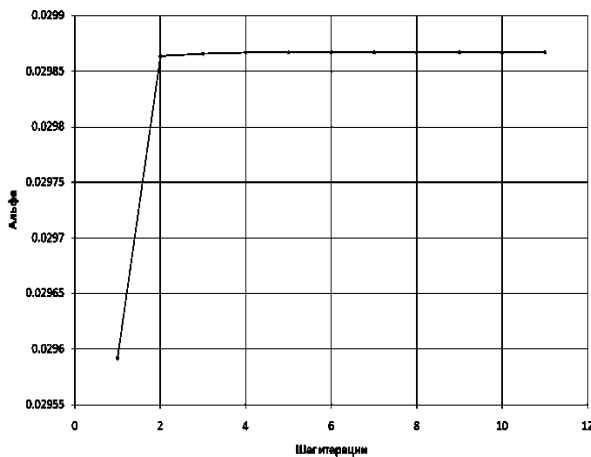


Рис. 2. След гребня для тяги Р

Изменение значения коэффициента  $\alpha$  в процессе итерации показано на рис. 3.

Рис. 3. Итерационный подбор  $\alpha$ 

По результатам итерационной процедуры принимаем  $\alpha = 0.029867$  и из уравнения (7) получаем:

$$\det(Z^*Z + \alpha \cdot I) = 7.505 \cdot 10^{-13}.$$

Характеристические числа  $\lambda_i$  новой матрицы плана имеют следующие значения:

$$\lambda = (0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.02987, 0.2987, 0.8815, 1.7221, 4.0314, 6.4845).$$

Зная значения вектора  $\vec{C}$  в системе уравнений (4), можем определить значение  $\delta P$ :  $\delta P = -0.01437$ .

Полученное значение сравниваем со значением, полученным из нелинейной поузловой модели:  $\delta P_{\text{мод}} = -0.00992$ .

Погрешность определения тяги с помощью ридж-оценивания равна  $(\delta P_{\text{мод}} - \delta P) \cdot 100\%$  составляет  $\Delta = 0.445\%$ .

Подобным образом смоделируем три различных изменения технического состояния и сравним результаты оценивания с результатами расчетов, полученными с использованием нелинейной модели:

$$\begin{aligned} &1. \text{ Изменяется } \delta A_{\text{твд}}, \delta \eta_{\text{твд}}: \\ &\delta P_{\text{квд}} = -0.02678, \delta T_{\text{т}} = 0.01464, \delta n_{\text{нд}} = -0.00598, \\ &\delta n_{\text{сд}} = -0.00845, \delta n_{\text{вд}} = -0.01908, \\ &\delta P = -0.02815; \delta P_{\text{мод}} = -0.01337; \Delta = 1.48\%. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &2. \text{ Изменяется } \delta \eta_{\text{твд}}, \delta \sigma_{\text{тс}}, \delta \eta_{\text{т}}: \\ &\delta P_{\text{квд}} = -0.00598, \delta T_{\text{т}} = -0.00101, \delta n_{\text{нд}} = -0.01381, \\ &\delta n_{\text{сд}} = -0.01245, \delta n_{\text{вд}} = -0.0079, \\ &\delta P = -0.00823; \delta P_{\text{мод}} = -0.03286; \Delta = 2.46\%. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &3. \text{ Изменяется } \delta \eta_{\text{квд}}, \delta \pi_{\text{квд}}, \delta \eta_{\text{твд}}, \delta \eta_{\text{тсд}}, \delta \eta_{\text{тв}}, \delta \sigma_{\text{вх}}: \\ &\delta P_{\text{квд}} = -0.02649, \delta T_{\text{т}} = 0.02883, \delta n_{\text{нд}} = -0.01164, \\ &\delta n_{\text{сд}} = -0.01147, \delta n_{\text{вд}} = -0.01283, \\ &\delta P = -0.04108; \delta P_{\text{мод}} = -0.04399; \Delta = 0.29\%. \end{aligned}$$

## Выводы

Рассмотрена проблема расчета неизмеряемых параметров ГТД при изменении технического состояния двигателя и недостатке информации об

этом изменении, обусловленном ограниченными возможностями измерительной системы.

Рассмотрены известные методы решения исследуемой проблемы, их достоинства и недостатки. Для решения поставленной задачи предложено использовать метод ридж-оценивания, который позволяет получить неточные (смещенные) оценки, но в условиях недостатка информации (при большем разбросе ошибок оценивания) эти оценки устойчивы и имеют меньшее значение полного среднего квадрата ошибок.

Предложенный метод проверен на примере нелинейной поузловой модели трехвального ТРДД. Оценена точность полученных результатов. Значения погрешностей лежат в диапазоне от 0,3% до 2,5% (тем больше, чем меньше степень смещения характеристик узлов).

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного метода, но показывают его высокие погрешности. Без уменьшения погрешностей исследуемый алгоритм для решения поставленной задачи не подходит, так как полученные значения погрешностей соизмеримы с искомыми отклонениями (так, например, в эксплуатации ГТД отклонение тяги больше чем на 2% свидетельствует о неудовлетворительном техническом состоянии). Пути к уменьшению значений погрешностей можно искать в двух направлениях:

1). Изменить алгоритм расчета параметра смещения  $\alpha$ , который применялся в данной работе.

2). Использовать определенные ограничения, при которых гребневая оценка будет абсолютно корректной [4]:

– байесовская формулировка регрессионной задачи при наличии определенных априорных данных о параметрах;

– формулировка регрессионной задачи как задачи МНК-оценивания с ограничениями определенного типа на параметры (например ограничения «сферического» типа:  $\beta_z' \beta_z \leq c^2$ , где  $c$  – радиус сферы).

## Литература

1. Демиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессии* / Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
2. Добрянский Г.В. *Динамика авиационных ГТД* / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. кн.1: пер. с англ.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
4. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. кн.2: пер. с англ.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.

5. Епифанов С.В. Определение тяги ГТД с учетом изменения технического состояния проточной части / С.В. Епифанов, М.В. Шевченко // *Авиационно-космическая техника и технология: научн.-техн. журн.* – 2009. – № 10 (67). – С. 184-189.

6. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.

7. Mathioudakis K. Multipoint non-linear method for enhanced component and sensor malfunction diagnosis / K. Mathioudakis, P. Kamboukos // *ASME Turbo Expo – 2006. ASME paper, GT – 2006 – 90451, May 8-11, 2006, Barcelona, Spain.* – 9 p.

8. Stamatis A. Optimum use of existing sensor information for gas turbine diagnostics / A. Stamatis // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50296, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.*

9. Borguet S. A generalized likelihood ratio test for adaptive gas turbine health monitoring / S. Borguet, O. L'èonard // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50117, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.* – 11 p.

10. Bauer M. Gas turbine fault diagnostics using a fusion of least squares estimations and fuzzy logic rules / M. Bauer, H. Lipowsky, D. Nagy, S. Staudacher // *ASME Turbo Expo – 2008. ASME paper, GT – 2008 – 50190, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.* – 10 p.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции авиационных двигателей Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ГТД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІДЖ-ОЦІНЮВАННЯ

*М.В. Шевченко, С.В. Єпіфанов*

Розглянуто проблему оцінювання відхилення невимірюваних параметрів ГТД шляхом статистичного аналізу відхилень вимірюваних в умовах зміни технічного стану двигуна і браку інформації щодо цієї зміни, обумовленого обмеженими можливостями вимірювальної системи. Розглянуто відомі методи вирішення досліджуваної проблеми, їх переваги та недоліки. Здійснено дисперсійний аналіз і виявлено мультиколінеарність елементів матриці плану поставленої задачі. Для вирішення проблеми було запропоновано процедуру з використанням «сліду гребеня» (ridge trace), яка дозволяє проводити аналіз нестійких оцінок у класі зміщених оцінок. За допомогою нелінійної повузлової моделі досліджуваного об'єкта було змодельовано дефекти проточної частини, і отримано оцінки відхилення досліджуваного параметра з використанням найпростішої ітераційної процедури ridge – оцінювання для поставленої задачі. Отримані результати з використанням найпростішої ітераційної процедури ridge-оцінювання. Визначено похибки оцінювання.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун (ГТД), діагностування, невимірювані параметри, тяга, кореляція, мультиколінеарність, статистична оцінка, рідж-оцінка.

### GAS TURBINE PARAMETERS DEVIATION DETERMINATION USING RIDGE-ESTIMATION

*M.V. Shevchenko, S.V. Yepifanov*

The problem of the gas turbine engine nonmetering parameters deviations estimation using deviation of monitored parameters statistical analysis has been handled. Possible changing of the engine technical condition and lack of information about this changing caused by metering system limited capacity has been taken into account. Known procedures of solving assigned problem are considered. Variance analysis has been carried out. Multicollinearity of the assigned task design matrix elements has been found out. The ridge-trace procedure that allows estimating unstable assessments in the biased assessments class has been suggested and analyzed. The faults of the engine gas path were modeled using nonlinear component-based model of observable object. The assessments of parameters deviation with simple iteration procedure of ridge-estimation application have been obtained. The accuracy of assessments has been estimated.

**Key words:** gas turbine engine, diagnostics, nonmetering parameters, thrust, correlation, multicollinearity, statistical assessment, ridge-assessment.

**Шевченко Максим Владимирович** – аспірант, м.н.с. кафедри конструкції авіаційних двигателів Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: mv\_shevchenko@ukr.net.

**Єпіфанов Сергій Валерьевич** – доктор техн. наук, професор, завідує кафедрою конструкції авіаційних двигателів Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

В.В. ПАНИН, С.В. ЕНЧЕВ, Л.Г. ВОЛЯНСКАЯ

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОМПАЖНЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОМПРЕССОРАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*В статье рассматривается проблема идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей. Обосновывается применимость метода распознавания помпажа с помощью разложения импульсной переходной функции двигателя в ряд ортонормированных функций Уолша. В качестве диагностического признака помпажа приняты коэффициенты разложения Уолша–Фурье. Разработаны алгоритм и функциональная схема устройства идентификации помпажа. Такой подход позволяет устранить возможность ложного срабатывания сигнализаторов помпажа вследствие резкой смены режима работы двигателя и уменьшить размерность пространства диагностических признаков.*

**Ключевые слова:** помпаж, авиационный газотурбинный двигатель, устройство идентификации, функции Уолша; ортогональное разложение.

### Введение

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) – это сложные тепловые машины специального назначения, которые состоят из большого количества связанных систем и устройств, к которым выдвигаются требования получения экстремальных значений параметров в заданных условиях эксплуатации (минимальная удельная затрата топлива в номинальном режиме, максимальная тяга при взлете и т.д.), а также потребность обеспечения других эксплуатационных характеристик ГТД [6].

Эти факторы приводят к постоянному осложнению конструкций современных ГТД, появления новых систем и устройств – регулируемых направляющих аппаратов, клапанов перепуска воздуха из компрессора, регулируемых систем охлаждения турбины и т.д. Такие осложнения конструкции вызывают возможность возникновения колебаний отдельных параметров, а также возможность влияния колебаний в одних системах на работу других систем и появление многочастотных колебаний в ГТД. Характерной особенностью всех этих режимов является наличие периодических составляющих.

**Анализ исследований и публикаций.** Как показывают результаты исследований представленных в [1 – 4], помпажные явления в ГТД приводят к потере тяги, сопровождаются ростом температуры газов перед турбиной и повышением уровня вибраций в результате больших амплитуд пульсаций давления и массовых затрат по тракту двигателя. Возможность появления этих явлений является серьез-

ной преградой на пути увеличения надежности ГТД в частности и безопасности полетов в целом [4].

Кратковременная потеря тяги в случае появления помпажа на одном из двигателей для многомоторного самолета или даже для одномоторного в случае достаточного для повторного запуска запасов высоты и скорости не приводит к катастрофической ситуации [1]. Однако рост температуры в турбине и увеличение уровня вибраций может привести к прогару турбины и разным поломкам [2]. Опыт эксплуатации [2 – 4] показывает, что особенно опасным для двигателя является недопустимый рост температуры газов перед турбиной.

**Постановка задачи.** Для увеличения запасов устойчивости ГТД используют [4, 6]: регулирование направляющих аппаратов компрессора, перепуск воздуха из отдельных ступеней компрессора, регулируемое дозирование подачи топлива на режимах запуска, приемистости дросселирования и т.д. Эти мероприятия уменьшают вероятность возникновения помпажных явлений, но не могут служить гарантией их устранения, так как помпаж может быть следствием отказов в самих системах, предназначенных для предупреждения срывов. Кроме этого, увеличение запасов устойчивости приводит к значительному снижению КПД компрессора и, соответственно, экономичности ГТД [4].

Поэтому целесообразно допустить небольшую вероятность возникновения помпажа, но оборудовать ГТД аварийными системами антипомпажной защиты и обеспечить максимальную экономичность двигателей [6].

Эффективность применения таких систем существенно зависит от метода идентификации заложенного в ее принцип действия. В этой связи особый интерес представляет метод идентификации, использующий ортогональное разложение импульсных переходных функций в ряд по функциям Уолша [1, 5]. В этом случае устраняется возможность ложного срабатывания сигнализаторов помпажа вследствие резких изменений режима работы ГТД, а также снизить размерность пространства диагностических признаков в сравнении с диагностированием на основе отсчетов исследуемого процесса [1].

### Свойства ортогональных функций Уолша

Рассмотрим основные свойства ортогональных функций Уолша, которые будем использовать при изложении разрабатываемых методов идентификации. Функции Уолша относятся к классу кусочно-постоянных ортогональных функций [5], который составил основу для создания и развития секветного анализа, т.е. исследования процессов с помощью несинусоидальных функций. Наиболее наглядно система функций Уолша выводится из системы функций Радемахера. Функция Радемахера с индексом  $m$ , обозначаемая  $r_m(t)$ , имеет вид последовательности прямоугольных импульсов и содержит  $2^{m-1}$  периодов на интервале  $[0,1]$ , принимая значения  $+1$  или  $-1$  (рис. 1). Исключение составляет функция  $r_0(t)$ , которая имеет вид единичного импульса.

Система функций Уолша является полной системой ортонормированных функций, т.е. любая абсолютно интегрируемая на интервале  $[0,1]$  функция может быть с заданной точностью представлена в виде взвешенной суммы конечного числа функций Уолша. Между функциями Уолша  $W_i(t)$  и функциями Радемахера  $r_i(t)$ :

$$\begin{aligned} W_0(t) &= r_0(t); \quad W_1(t) = r_1(t); \\ W_2(t) &= (r_2(t))^1 (r_1(t))^0; \quad W_3(t) = (r_2(t))^1 (r_1(t))^1; \\ W_4(t) &= (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^0; \\ W_5(t) &= (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^1; \\ &\dots\dots\dots \\ W_n(t) &= (r_q(t))^\alpha (r_{q-1}(t))^\beta (r_{q-2}(t))^\gamma \dots \end{aligned}$$

Здесь  $q = \text{int}(\log_2 n) + 1$ , где  $\text{int}$  означает взятие наибольшего целого;  $2^{q-1}\alpha + 2^{q-2}\beta + 2^{q-3}\gamma + \dots = n$ , т.е.  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  – двоичное разложение числа  $n$ .

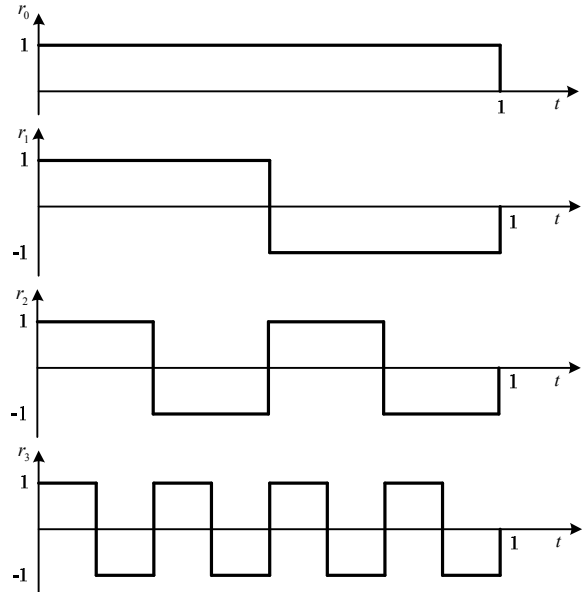


Рис. 1. Система ортонормированных функций Радемахера

Первые пять членов системы ортонормированных функций Уолша представлены на рис. 2.

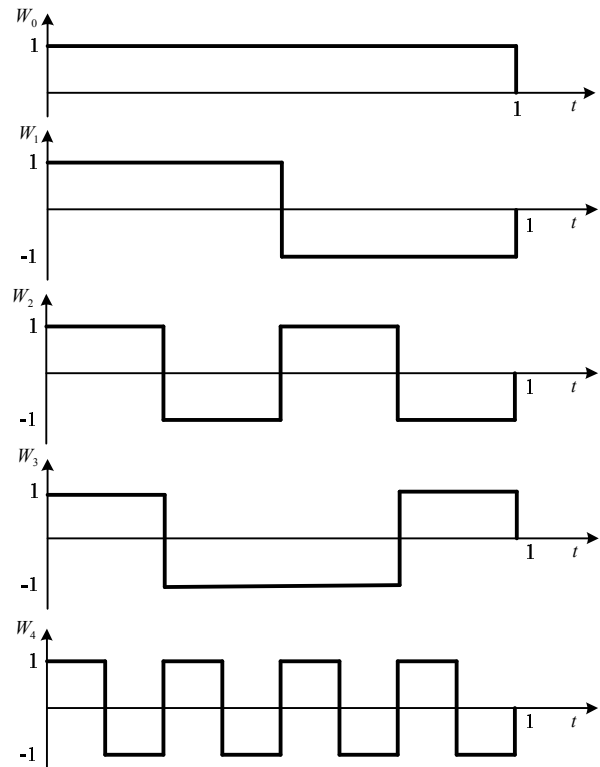


Рис. 2. Система ортонормированных функций Уолша

### Метод идентификации с применением функций Уолша

Этот метод является методом пассивной идентификации. Здесь импульсная переходная функция (ИПФ)  $\omega(\tau)$  ГТД представляется в виде:

$$\omega(\tau) = \sum_{i=0}^n a_i W_i(\tau), \quad \tau \in [0; T], \quad (1)$$

где  $T$  – интервал определения функций Уолша.

Интервал определения функций Уолша  $T$  выбирается большим или равным эффективной длительности ИПФ. Выходной сигнал  $y^*(t)$ , рассчитанный по модели (1), определяется выражением свертки

$$y^*(t) = \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau.$$

Определим среднеквадратическую ошибку  $\varepsilon^2$  рассогласования измеренного  $y(t)$  и модельного  $y^*(t)$  сигналов:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \frac{1}{L} \int_0^L [y(t) - y^*(t)]^2 dt = \\ &= \frac{1}{L} \int_0^L \left[ y(t) - \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau \right]^2 dt, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $L$  – длительность интервала наблюдения.

Определим коэффициенты разложения  $a_i$  из условия минимума выражения (2):

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_j} = 0, \quad j = \overline{0, n}. \quad (3)$$

Дифференцируя (2) и подставляя в (3) получим систему линейных уравнений для определения  $a_i$ :

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n a_i \int_0^L K_j(t) K_i(t) dt &= \int_0^L y(t) K_j(t) dt, \quad j = \overline{0, n}; \quad (4) \\ K_i(t) &= \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau; \quad K_j(t) = \int_0^T W_j(\theta) x(t-\theta) d\theta. \end{aligned}$$

Для дискретных значений  $x(t)$  и  $y(t)$  измеряемых с частотой дискретизации  $\Delta$  систему уравнений (4) можно привести к виду [1]:

$$\sum_{i=0}^n a_i c_{ij} = b_j, \quad j = \overline{0, n}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $c_{ij}$  и  $b_j$  вычисляются за формулами ( $j = \overline{0, n}$ ):

$$b_j = \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} y^*(k\Delta) K_j(k\Delta); \quad (6)$$

$$c_{ij} = \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} K_i(k\Delta) K_j(k\Delta); \quad i = \overline{0, n}; \quad (7)$$

$$K_j(k\Delta) = \Delta \sum_{s=1}^{T/\Delta} W_j(s\Delta) x(k\Delta - s\Delta); \quad k = \overline{1, L/\Delta}. \quad (8)$$

Период дискретизации  $\Delta$  согласно теореме Котельникова определяется граничной частотой

пропускания ГТД, т.е.  $\Delta = 1/f_{гр}$ . На практике  $f_{гр}$  часто бывает неизвестна. В этом случае величину  $\Delta$  можно ориентировочно оценить как [1]

$$\Delta = \frac{T_{\min}}{(5 \dots 10)},$$

где  $T_{\min}$  – ожидаемая минимальная постоянная времени объекта.

### Выбор оптимальных решающих правил алгоритмов идентификации

Выбор оптимальных решающих правил определяется прежде всего доступной априорной и апостериорной информацией. Доступной апостериорной информацией будем считать только идентифицируемые коэффициенты разложения ИПФ в ряд по функциям Уолша  $\{a_j\}$ . Обозначим необходимую в любом случае априорную информацию через алфавит ситуаций  $\{D_i\}$ . Рассмотрим различные варианты распознавания ситуации в ГТД в зависимости от объема априорной информации.

Проанализируем случай, когда известны лишь направления изменения величин коэффициентов разложения ИПФ при переходе от нормальной работы к помпажу. Тогда возможно применение весьма простой процедуры диагностирования, основанной на анализе знака отклонения контролируемого параметра от номинального значения. При этом для повышения надежности диагностирования целесообразно выделять интервалы  $(a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  для каждого коэффициента разложения  $a_j$  с номинальным значением  $a_j^0$  и погрешностью определения  $\varepsilon_j$ . Закодируем случай  $a_j \in (a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  величиной 0, случай  $a_j < a_j^0 - \varepsilon_j$  величиной -1, а случай  $a_j > a_j^0 + \varepsilon_j$  – величиной +1.

Информация о поведении коэффициентов разложения в различных ситуациях сводится в таблицу ситуаций, в которой столбцы соответствуют всем возможным ситуациям, а строки – всем коэффициентам разложения. В соответствующих клетках по приведенному правилу проставляются 0, +1 или -1.

В случае, когда известны значения коэффициентов разложения во всех ситуациях, каждое состояние диагностируемой системы можно представить в виде  $(n+1)$ -мерного вектора  $A$  с компонентами

$$\{a_{j0}, a_{j1}, \dots, a_{jn}\}.$$

Задача классификации ситуации  $\{D_i\}$  в этом случае формулируется следующим образом: требу-

ется отнести предъявляемую совокупность коэффициентов разложения к одному из заранее установленных ситуаций. В случае, когда имеется достаточная статистическая информация: априорные вероятности ситуаций  $P(D_i)$ , условные плотности значений признаков  $f(a_j/D_i)$ , причем эти распределения одномодальны, целесообразно применение статистических методов распознавания, например статистического метода минимального риска [1].

### Алгоритм и устройство идентификации помпажа ГТД

Принимая, в качестве диагностического признака помпажа коэффициенты разложения в ряд по функциям Уолша исследуемого процесса на фиксированном интервале, можно сформулировать алгоритм идентификации в виде:

1. Вводится новое измеренное значение процесса  $y_j^*$ .

2. За этим значением и  $(2^n - 1)$  предыдущим значениям процесса вычисляются текущие значения коэффициентов разложения по выражению (5).

3. Распознавание помпажа осуществляется путем сравнения текущих коэффициентов разложения с эталонными.

Ситуация считается выявленной, если модуль разности между текущими значениями коэффициентов разложения и соответствующими эталонными значениями не превосходит заданной величины – порога распознавания, определяемого на этапе формирования признаков по разбросу коэффициентов разложения для различных реализаций процессов в одной ситуации и погрешностям идентификации.

На рис. 3 показана функциональная схема устройства идентификации помпажа, которое реализует приведенный алгоритм.

Для вычисления функций Уолша  $W_i(t)$  в момент времени  $t \in [0, 1]$  можно воспользоваться выражением [5]:

$$W_i(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 0; \\ -1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 1, \end{cases}$$

где  $S_{it}$  – разряды, в которых при двоичном разложении  $i$  и  $t$  одновременно находятся единицы; знак  $\oplus$  означает сложение по модулю 2.

Процедура вычисления коэффициентов Уолша–Фурье довольно просто реализуется на элементах цифровой техники. На рис. 4 представлена схема устройства для вычисления коэффициентов Уолша–Фурье [5]. Это устройство содержит генератор тактовых импульсов (ГТИ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), генератор функций Уолша

(ГФУ), преобразователь прямого кода в дополнительный (ППКД) и накапливающий сумматор (НС).



Рис. 3. Устройство идентификации помпажа

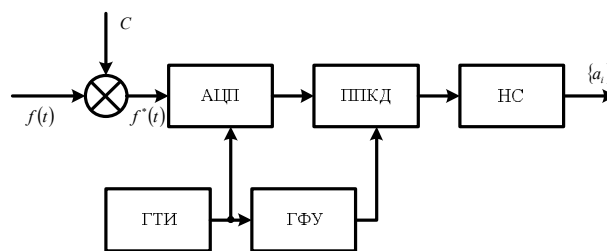


Рис. 4. Устройство вычисления коэффициентов Уолша–Фурье

Здесь вычисляются коэффициенты разложения  $a_i$  знакопостоянного сигнала

$$f^*(t) = f(t) + C \geq 0,$$

где  $C = \text{const}$ , которые, очевидно, для  $i \neq 0$  являются и коэффициентами Уолша – Фурье сигнала (функции)  $f(t)$ .

### Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода идентификации основанного на ортогональном разложении импульсной переходной функции в ряд по функциям Уолша. Разработан алгоритм и схема устройства идентификации помпажа, в котором в качестве диагностического признака приняты коэффициенты разложения по функциям Уолша. Формирование классов производится на основе анализа большого количества экспериментальных кривых изменения параметров рабочего процесса при помпаже и нормальной работе двигателя.

## Литература

1. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов / В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, А.И. Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Методика визначення границі помпажу на змінених характеристиках компресора ТРД / М.С. Кулик, В.В. Панін, В.В. Ратинський, Б.М. Моїсєєв // Вісник Київського міжнародного університету цивільної авіації: зб. наук. пр.; М-во освіти і науки України, Нац. авіац. ун-т. – К., 2001. – № 2 (9). – С. 5-8.
3. Панін В.В. Метод и устройство распознавания предпомпажных явлений в компрессорах авиационных ГТД / В.В. Панін, И.Ф. Кинашук, В.И. Орланов // Актуальні проблеми автоматизації

та інформаційних технологій. – 2001. – № 4. – С. 63-69.

4. Волянська Л.Г. Методи і засоби підвищення газодинамічної стійкості компресорів газотурбінних двигунів : монографія / Л.Г. Волянська, В.В. Панін, Сунь Гаюю. – К. : НАУ, 2005. – 200 с.

5. Многоуровневое управление динамическими объектами: монография / В.И. Васильев и др. – М.: Наука, 1987. – 309 с.

6. Панін В.В. Аналіз методів побудови систем протипомпажного захисту авіаційних газотурбінних двигунів / В.В. Панін, С.В. Єнчев // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. ISDMCI'2010: міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп.; М-во освіти і науки України, Херсонський нац. техн. ун-т. – Херсон, 2010. – Т. 2. – С. 502-505.

Поступила в редакцію 31.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.М. Митрахович, ГК «Укрспецекспорт», Киев.

#### ВИКОРИСТАННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ РОЗКЛАДАНЬ У ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ЯВИЩ В КОМПРЕСОРАХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*В.В. Панін, С.В. Єнчев, Л.Г. Волянська*

У статті розглядається проблема ідентифікації помпажних явищ в компресорах авіаційних газотурбінних двигунах. Обґрунтовується можливість застосування методу розпізнавання помпажа за допомогою розкладу імпульсної перехідної функції двигуна в ряд ортонормованих функцій Уолша. Діагностичною ознакою помпажу прийняті коефіцієнти розкладу Уолша-Фур'є. Розроблені алгоритм і функціональна схема пристрою ідентифікації помпажу. Такий підхід дозволяє усунути можливість помилкового спрацьовування сигналізаторів помпажу внаслідок режиму роботи двигуна та зменшити розмірність простору діагностичних ознак.

**Ключові слова:** помпаж, авіаційний газотурбінний двигун, пристрій ідентифікації, функції Уолша; ортогональне розкладання.

#### USAGE OF ORTOGONAL DECOMPOSITIONS IN TASKS OF SURGE PHENOMENA IDENTIFICATION IN AVIATION TURBO-ENGINES COMPRESSORS

*V.V. Panin, S.V. Enchev, L.G. Volyanska*

The article sets out to analyze the problem of the surge phenomena identification in compressors aviation turbo-engines. Surge recognition method is grounded by decomposition of impulsive transitional engine function by means of Walsh orthonormal functions application. As the diagnostic sign of surge are taken the coefficients of Walsh-Fourier decomposition. An algorithm and functional scheme of surge identification device is developed. Such approach allows to remove possibility of false wearing-out of surge signaling because of the sharp changing of the engine operations mode of and to decrease the space dimension of diagnostic signs.

**Keywords:** surge, aviation turbo-engine, identification device, Walsh function; ortogonal decomposition.

**Панін Владислав Вадимович** – д-р техн. наук, проф., декан механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: mef@nau.edu.ua.

**Єнчев Сергій Васильєвич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації і енергоменеджмента механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: esw@ukr.net.

**Волянська Лариса Георгіївна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри авіаційних двигателів механіко-енергетического факультета Аерокосміческого інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

УДК 618.518

Г.Г. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, К.А. РИЗВАНОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия<sup>2</sup>ОАО «НПП «Мотор», Уфа, Россия

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНТЕГРАЦИЯ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГТД И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ CALS

*В работе приведен подход к построению архитектуры информационной модели для газотурбинного двигателя (ГТД) с его электронной системой автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД). Отмечено, что при применении выделенных телекоммуникационных каналов информационная технология интеграции моделей жизненного цикла ГТД совместно с его САУКиД реализуется в распределенном виде. Отмечено, что при испытаниях САУКиД ГТД на полунатурных стендах, на стендах с реальным двигателем и на самолете, они могут быть интегрированы в сквозную комплексную технологию на основе имитации основных, контрольных, диагностических сервисных и других функций. Рассматривается на этапах разработки, производства и эксплуатации ГТД.*

**Ключевые слова:** информационные технологии, CALS-технологии, этапы жизненного цикла ГТД, система автоматического управления, контроля и диагностики.

### Введение

В условиях повышения наукоемкости изделий авиационной техники – ГТД совместно с САУКиД возникает необходимость в применении современных информационных технологий, обеспечивающих высокое качество продукции на всех этапах жизненного цикла. Информационные пространства предприятий, участвующих в разработке, производстве и эксплуатации ГТД, в настоящее время достаточно полно структурированы и компьютеризированы [2, 3].

Особый интерес представляет разработка информационной технологии, интегрирующей процессы доводки и производства в ОКБ-изготовителе системы управления и ОКБ-изготовителе двигателя. Для решения данной проблемы определены требования CALS-технологий, поддерживаемые стандартами STEP [2, 4, 5].

Применение выделенных телекоммуникационных каналов позволяет реализовать указанную выше технологию в распределенном виде, т.е. физически проводя испытания параллельно в темпе эксперимента на двигательном стенде и полунатурном стенде.

### 1. Постановка задачи

В ходе практического применения таких решений встречаются существенные трудности информационно-технологического плана. Во-первых,

сложность процесса проведения испытания ГТД, начиная от подготовки технической документации до обработки результатов испытаний, связанная с большими материальными затратами и требующая высокой точности получения и обработки результатов. Во-вторых, до сегодняшнего дня две системы: система автоматического управления (САУ) со своей встроенной системой контроля и система контроля и диагностики состояния ГТД разрабатывались автономно.

Но появление концепции электронных систем с полной ответственностью типа FADEC позволило объединить в одну структуру систему управления, систему контроля и систему диагностики ГТД [6, 7].

Отмеченные проблемы требуют разработки научно обоснованных методов построения интегрированной модели, т.е. определения структуры ЖЦ для комплексной системы САУКиД типа FADEC и ЖЦ ГТД. Целесообразно разработать структуру ЖЦ объединения САУКиД и этапов ЖЦ, связанного непосредственно с разработкой, созданием и испытанием самого ГТД по признакам их информационных взаимодействий.

Предлагается развивать методы CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства и эксплуатации ГТД и его систем, направленных на повышение эффективности работ за счет координации и ускорения организационных и производственных процессов.

Основу данной технологии должны составить универсальный полунатурный стенд, находящийся в ОКБ–изготовителе системы управления, являющийся основным инструментом создания эксплуатационного сопровождения электронных САУКиД и содержащий в своем составе под-

системы имитации отказов, внешних условий и информационного взаимодействия с самолетными системами [8].

На рис. 1 представлена количественная характеристика имитации количества функций и степени полноты контроля.

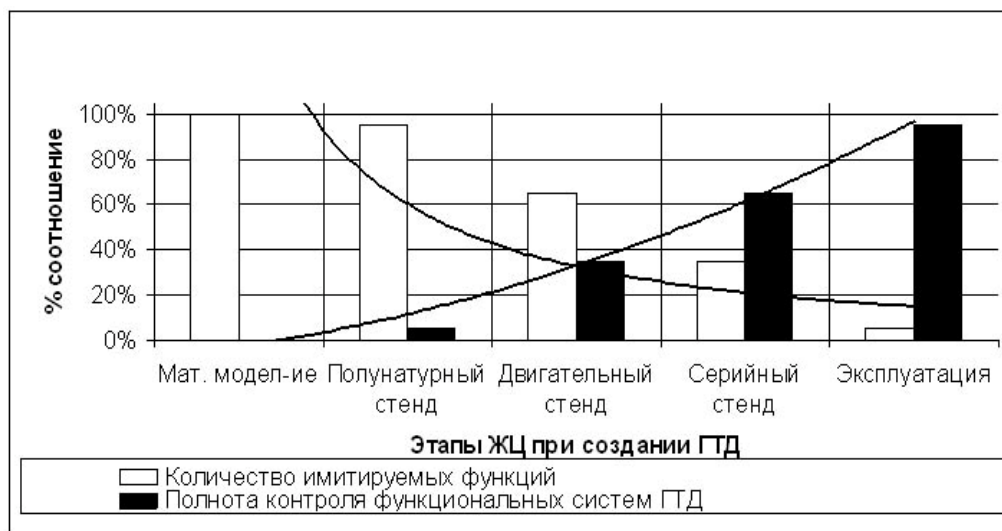


Рис. 1. Количественная характеристика имитации функций и степени полноты контроля

## 2. Анализ полученных результатов

Наличие указанных средств, формирующих электронное пространство, позволяет создавать различные модели ЖЦ как объективное отображение сложившихся технологических процессов и взаимосвязей на различных стадиях проектирования, производства и эксплуатации.

В такой постановке может существовать множество моделей ЖЦ ГТД, которые с разной степенью адекватности соответствуют реальным ЖЦ. В этом множестве можно выделить наиболее эффективные модели ЖЦ.

Отметим, что управление ЖЦ ГТД может эффективно осуществляться только на основе его адекватной модели. Поэтому задача создания модели ЖЦ как адекватного описания эволюционно сложившихся отношений и взаимосвязей как между организациями, так и в одной организации, отвечающих заданным требованиям формализации как необходимого условия автоматизации, является актуальной.

Одним из основных аспектов организации информационных связей и соответствующих им информационных потоков являются потоки с оперативной информацией о состоянии конкретных экземпляров самолетов и соответственно двигателей.

Оперативные данные о состоянии двигателя на этапе создания и производства определяются, пре-

жде всего, данными, полученными при испытаниях. В эксплуатации данными, эквивалентными испытаниям, являются параметры работы двигателя в эксплуатации.

Анализ существующих схем организации эксплуатации ГТД в составе самолета показывает, что линейно-штабная схема организации теряет свою эффективность. Это объясняется тем, что появляется возможность непрерывного мониторинга состояния ГТД в течение его ЖЦ, в том числе эксплуатации и ремонта ГТД по его состоянию. В функциональном аспекте начинают преобладать технологии ремонта и восстановления ГТД на основе сменной модульности, когда в случае неисправности происходит замена конструктивного модуля, который затем отправляется на ремонт в специализированные предприятия. При этом предполагается, что с помощью непрерывного мониторинга во время эксплуатации определяется и состояние ГТД в целом.

Соответственно это определяет и новую схему организации управления (снабжением запасными ресурсами).

Эксплуатация и ремонт, как правило, организуются и управляются, и в какой-то части выполняются производителем и разработчиком ГТД.

Среди новых концепций перспективной представляется идея информационной интеграции стадий ЖЦ ГТД и САУКиД. Она состоит в создании

интегрированной информационной среды, позволяющей консолидировать информацию стадий ЖЦ ГТД и САУКиД.

Информационная интеграция заключается в том, что все автоматизированные системы, применяемые на различных стадиях ЖЦ, оперируют не с традиционными документами, а с формализованными информационными моделями, описывающими процессы создания и испытаний ГТД и САУКиД. Эти модели существуют в интегрированной информационной среде в электронной форме в виде информационных объектов.

Системы, которые используют те или иные информационные объекты, извлекают их из интегрированной информационной БД, обрабатывают, создавая новые объекты, и помещают в интегрированную БД [1].

Чтобы все это было возможно, информационные модели и соответствующие IT-технологии должны быть стандартизованы.

Интегрированная информационная среда представляет собой совокупность распределенных гетерогенных хранилищ данных (ХД), в которых действуют стандартные правила обработки, хранения, обновления, поиска и передачи информации, через которые осуществляется “бесбумажное” информационное взаимодействие между всеми этапами жизненного цикла как ГТД, так и его системы автоматического управления, контроля и диагностики.

Среди CALS-технологий ключевой является технология интеграции данных об изделии – PDM/PLM-технология – управление ЖЦ ГТД и САУКиД в эксплуатации. Она предназначена для управления всеми данными об изделии и информационными процессами ЖЦ ГТД и САУКиД, создающими и использующими эти данные.

## Заключение

Анализ современных технологий испытаний электронных систем автоматического управления, контроля и диагностики ГТД на полунатурных стендах, на стендах с реальным двигателем и на самолете показывает, что они могут быть интегрированы в сквозную комплексную информационную технологию испытаний на основе имитации (полунатурного моделирования) основных, контрольных, диагностических, сервисных и других функций.

Для решения этой задачи можно использовать опыт создания и применения полунатурных стендов, применяемых разработчиком для испытания электронных систем автоматического управления, контроля и диагностики

## Литература

1. Kulikov G.G., Thompson H.A. (Eds). *Dynamic modelling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring, and optimal control* / G.G. Kulikov, H.A. Thompson. – London, New York, Springer, 2004. – 309 p.
2. Погорелов Г.И. Информационная поддержка управления жизненным циклом испытаний ГТД на основе CALS-технологий / Г.И. Погорелов, Б.К. Галимханов, К.А. Ризванов // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Сер. Управление, информатика и выч. техника. – 2007. – Т. 9, № 4 (22). – С. 57-63.
3. Гумеров Х.С. Системная модель информационной поддержки длительных испытаний и эксплуатации газотурбинного двигателя на основе показателя остаточного ресурса / Х.С. Гумеров, Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности: матер. 3-й науч.-практ. конф. молодых специалистов и ученых. – М.: ОАО “ОКБ Сухого”, 2005. – С. 583-586.
4. Погорелов Г.И. Организационно-функциональная модель процесса проведения испытаний ГТД в соответствии с CALS-технологиями / Г.И. Погорелов, К.А. Ризванов, М.Р. Азанов // Труды междунар. конф. комп. наук и информ. техн. (CSIT’2007). – Красноуфимск, Уфа, 2007. – Т. 2. – С. 177-180.
5. Куликов Г.Г. Формирование структуры модели жизненного цикла ГТД, отвечающей требованиям CALS-технологий / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности. CALS-технологии в авиационной промышленности: матер. 4-й науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: ОАО “ОКБ Сухого”, 2007. – С. 704-707.
6. Куликов Г.Г. Разработка архитектуры информационной подсистемы испытаний ГТД / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов // Матер. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. – Уфа: ОАО УМПО, 2008. – С. 118-119.
7. Куликов Г.Г. Об информационной технологии, интегрирующей процессы разработки, производства и эксплуатации ГТД / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов, С.С. Денисова // Матер. междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2009. – Ч. 2. – С. 160-161.
8. Куликов Г.Г. Архитектура интегрированной информационной модели для разработки, производства и эксплуатации ГТД совместно с его системой автоматического управления, контроля и диагностики / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов, С.С. Денисова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва № 3 (19) Часть 1. Спец. Выпуск, подгот. По матер. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – 2009. – С. 244-252.

Поступила в редакцию 20.05.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, заместитель Генерального директора ФГУП " УНПП "Молния" Г.И. Погорелов, Россия.

### **ІНФОРМАЦІЙНА ІНТЕГРАЦІЯ СТАДІЙ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ГТД І СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ CALS**

**Г.Г. Куліков, К.А. Різванов**

У роботі приведено підхід до побудови архітектури інформаційної моделі для газотурбінного двигуна (ГТД) з його електронною системою автоматичного управління, контролю і діагностики (САУКіД). Відмічено, що при застосуванні виділених телекомунікаційних каналів інформаційна технологія інтеграції моделей життєвого циклу ГТД спільно з його САУКіД реалізується в розподіленому вигляді. Відмічено, що при випробуваннях САУКіД ГТД на напівнатурних стендах, на стендах з реальним двигуном і на літаку, вони можуть бути інтегровані в крізну комплексну технологію на основі імітації основних, контрольних, діагностичних сервісних і інших функціях. Розглядається на етапах розробки, виробництва і експлуатації ГТД.

**Ключові слова:** інформаційні технології, CALS-технології, етапи життєвого циклу ГТД, система автоматичного управління, контролю і діагностики.

### **INFORMATION INTEGRATION OF LIFE CYCLE STAGES GTE AND AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS AND DIAGNOSTICS ACCORDING TO REQUIREMENTS CALS**

**G.G. Kulikov, K.A. Rizvanov**

In work the approach is led to construction of architecture of information model for GTE with its electronic automatic control system, the control and diagnostics (ACSCD). It is noticed that at application of the allocated telecommunication channels the information technology of integration of models of life cycle GTE together with it ACSCD is realised in the distributed kind. It is noticed that at tests of ACSCD GTE at seminatural stands, at stands with the real engine and by the plane, they can be integrated into through complex technology on the basis of imitation the basic, control, diagnostic service and other functions. It is considered at development cycles, manufacture and operation GTE.

**Key words:** Information technology, CALS-technologies, stages of life cycle GTE, system of automatic control, the control and diagnostics.

**Куликов Геннадий Григорьевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: gennadyg\_98@yahoo.com.

**Ризванов Константин Анварович** – канд. техн. наук, начальник бригады ВТ ОАО «НПП «Мотор», доцент кафедры АСУ Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: rizvanovk@bk.ru.

УДК 629.735.083.03.004.58:004.801.3(045)

О.Г. КУЧЕР, С.О. ДМИТРИЄВ, О.В. ПОПОВ, О.С. ЯКУШЕНКО

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРДД

*Розглянуті питання побудови ефективної процедури навчання і оптимальної структури нейронної мережі для діагностування конструктивних вузлів проточної частини газотурбінного двигуна. При цьому вирішуються завдання уточнення структури, вибору алгоритму навчання з тестуванням за критеріями швидкості навчання, якості розпізнавання за навчальною та перевіркою вибірками та за зміною функціонала похибки. У підсумку, авторами розроблено методику оптимізації структури нейронної мережі з метою уникання ефекту «перенавчання» мережі при вирішенні завдань параметричного діагностування авіаційного газотурбінного двоконтурного двигуна.*

**Ключові слова:** нейронна мережа, навчання мережі, діагностування, оптимізація структури, кількість нейронів, критерій адекватності, перенавчання мережі.

### Постановка проблеми та задач

Представлена робота є продовженням розробок, приведених авторами у наукових працях [1 – 13].

Перспективним напрямком автоматизованого діагностування турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) з глибиною діагностування до конструктивного вузла є використання у складі експертної системи нейронних мереж (НМ). Однією з особливостей такої мережі є гнучкість і поліморфізм її структури. Найважливішими при побудові (розробки архітектури) НМ є три питання: визначення типу НМ; вибір методу її навчання; визначення кількості шарів та нейронів у її шарах і характеристик нейрона – функції активації (ФА). При цьому рекомендації такого вибору відсутні або носять загальний характер. З огляду на це об'єктом цієї роботи є створення методики отримання оптимальної архітектури НМ з урахуванням гіпотези про виникненні відмови одного або 2-х вузлів проточної частини ТРДД одночасно. Об'єктом досліджень обрано статичні НМ.

### Вибір алгоритму навчання мережі

Як об'єкт контролю обрано ТРДД ПС-90А [14]. Набір діагностичних даних для навчання НМ містив інформацію про 16 класів. Кожен клас був представлений 20 точками. Перші 20 точок представляють бездефектний ГТД (1 клас), з 21 по 120 – первинні класи, що характеризують деградацію одного з вузлів – зовнішнього контуру вентилятора (2), компресора високого тиску (3), камери згоряння (4), турбін високого (5) і низького тиску (6), з 121 по 320 – вто-

ринні класи, що є попарними комбінаціями первинних класів: комбінація класів 2 + 3 (7), 2+4 (8), 2+5 (9), 2+ 6 (10), 3 + 4 (11), 3 + 5 (12), 3 + 6 (13), 4 + 5 (14), 4 + 6 (15), 5 + 6 (16). Усього навчальний набір містить 320 точок. Докладний опис навчального набору та метод його формування наведено у роботах [2, 11]. Найбільш доцільно почати побудову НМ з вибору алгоритму навчання. У роботі було апробовано 12 найбільш відомих методів навчання: алгоритми сполучених градієнтів: Флетчера-Пауела (скорочена назва CGF), Полака-Рібейри (CGP), регуляризації Bayesian (BR); Бієля-Пауела (CGB); квазіньютонів алгоритми: Левенберга-Марквардта (LM), Бroyдена-Флетчера (BFG), одноступінчатий метод пересічних Батіті (OSS); градієнтний граничний алгоритм зворотного поширення помилки (RP); метод градієнтного спуску з урахуванням моментів та адаптивного навчання (GDX) та ін [3].

Якість розпізнавання стану ГТД оцінювалась за допомогою чотирьох критеріїв, що характеризують помилки розпізнавання при відношенні двигуна до справного або несправного станів:

- помилка класифікації – всі помилки неправильної класифікації стану двигуна;
- помилка першого роду;
- помилка не розпізнавання в подвійній відмові хоча б одного з двох вузлів, що відмовили;
- груба помилка – помилка другого роду.

Оцінка ефективності алгоритму навчання НМ (рис. 1, 2) здійснювалась на основі навчальної (НВ) та перевіркою (ПВ) вибірок. Остання була сформована за тими ж принципами що й НМ і мала таку ж структуру але відрізнялася від неї тим, що перша була побудована на початковій стадії розвитку де-

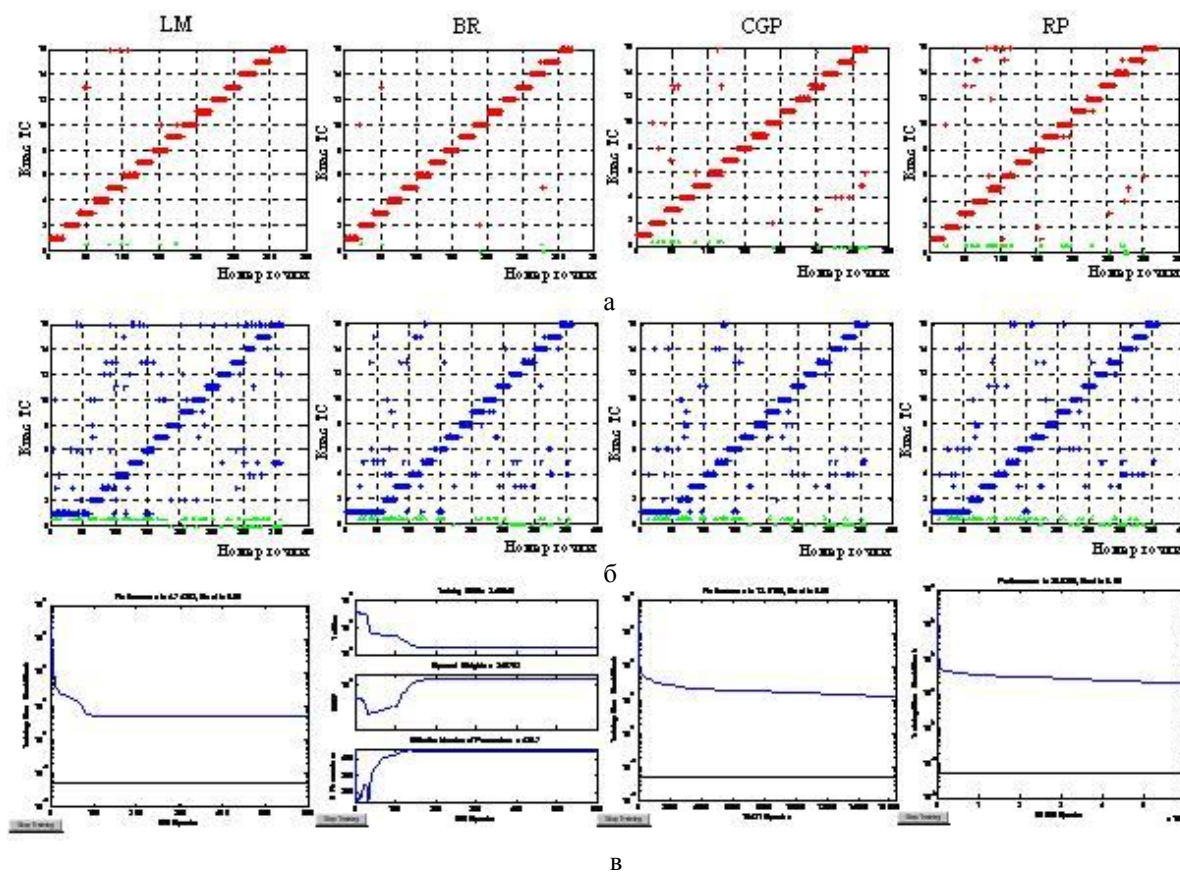


Рис. 1. Результат класифікації першою групою методів:

а – НВ; б – ПВ; в – функціонал помилки

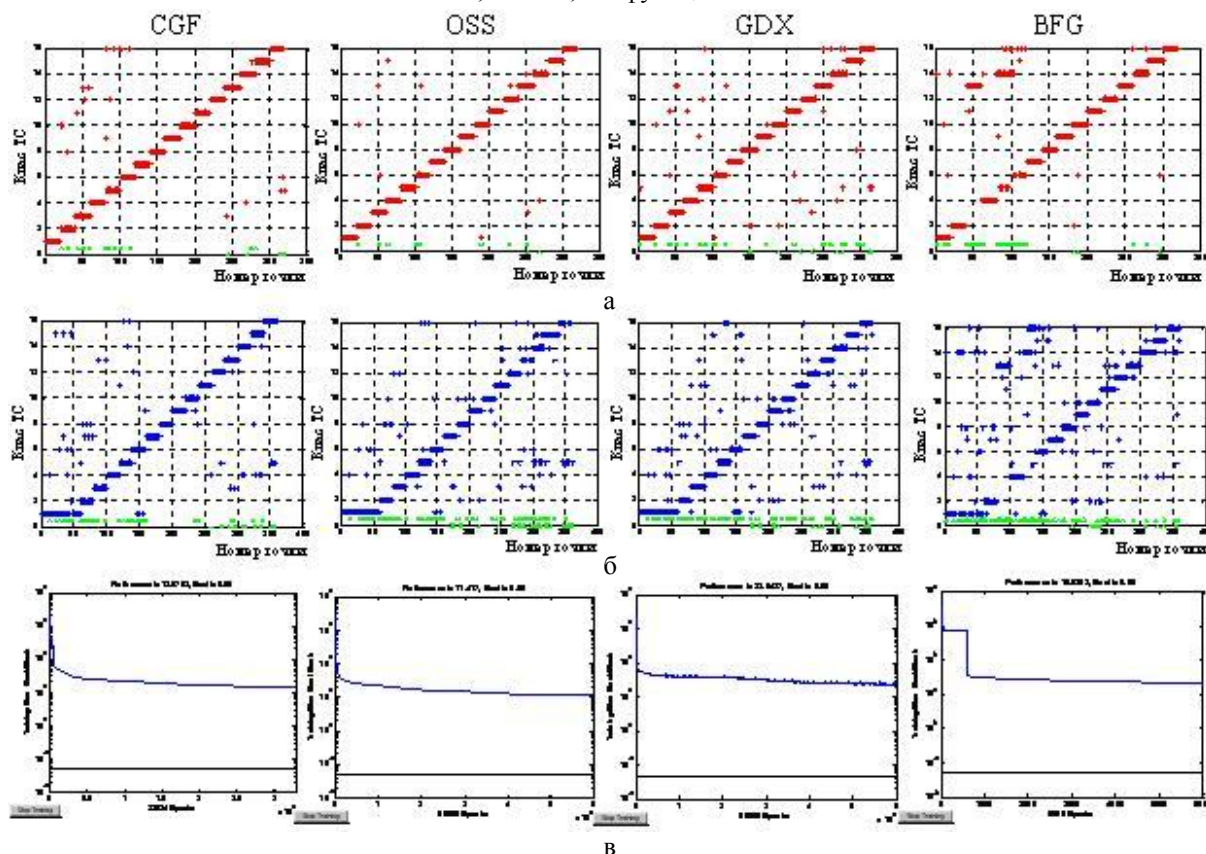


Рис. 2. Результат класифікації другою групою методів:

а – НВ; б – ПВ; в – функціонал помилки

Фекту, друга – на пізній. Процес навчання НМ в цілому випадковий тому було проведено декілька (5) спроб апробації алгоритмів навчання НМ.

На рис. 1 и 2 наведені результати процесу навчання мережі для однієї з спроб та підсумки класифікації стану ГТД.

У верхній частині а) вказані результати розпізнавання даних НВ різними методами. Для наочності результати показані у координатах клас ТС - номер точки. Якщо точки графіка лежать на відповідних полицях, які відповідають даному стану ГТД то розпізнавання стану здійснюється вірно в іншому випадку мають місце помилки класифікації. Якщо точки розміщуються над першою полицею то замість нормального стану ГТД розпізнається один з дефектних станів тобто мають місце помилки першого роду. Якщо точки графіка з 21 по 320 лежать на рівні 1-ї полиці то замість дефектів розпізнається нормальний стан ГТД – помилки другого роду і т.д. На рівні б) приведені результати розпізнавання ПВ, яка тестується за даними НВ, тому помилок класифікації тут значно більше. На рівні в) показано динаміку зміни функціонала помилки SSE (Sum squared error) цих алгоритмів в процесі навчання. За характером зміни цієї кривої можна судити про швидкість та якість навчання НМ в т.ч. на початковій стадії процесу. Навчання мережі буде тим якіс-

нішим чим менше значення функціонала помилки SSE. Якщо крива перетинає встановлену граничну межу то це має означати 100 % якість навчання, при якій помилки класифікації відсутні.

Швидкість зміни кривої на початковій стадії процесу дозволяють класифікувати алгоритми за швидкістю навчання.

Всі розглянуті алгоритми навчання мережі можна умовно розділити на три групи за критерієм час навчання - кількість кроків обчислень функціоналу. До першої групи віднесено методи LM та BR, в яких кількість кроків розрахунків функціоналу невелика, але час розрахунку кожного кроку значний. В інших час розрахунку кроку зменшується, але й зменшується середня швидкість сходження функціоналу за один крок.

Щоб тестування алгоритмів проходило в однакових умовах для всіх типів алгоритмів встановлено єдиний час тестування і визначені граничні значення кількості кроків розрахунків функціоналу для різних алгоритмів від 600 до  $6 \cdot 10^4$ .

Аналізуючи результати апробації обраних алгоритмів навчання НМ за результатами навчання можна зробити висновок, що найбільш ефективними алгоритмами для НВ є: LM та BR, далі алгоритми займають наступні позиції: CGP, OSS, SCG, CGF, RP, BFG, GD (рис. 3).

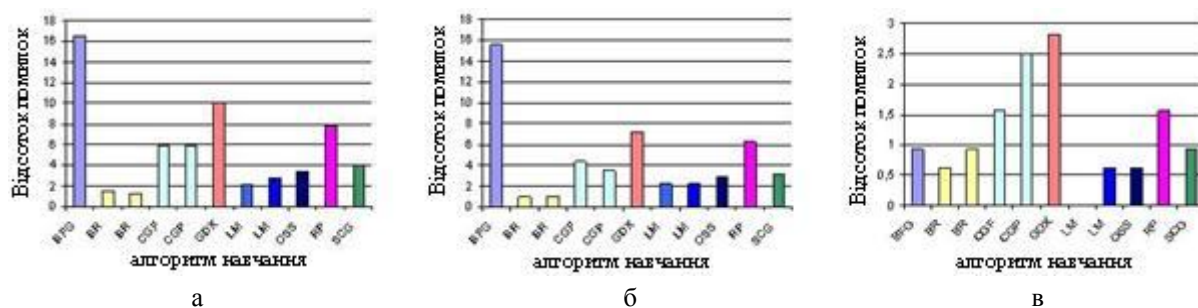


Рис. 3. Результати тестування на якість розпізнавання НВ:

а – помилки класифікації; б – помилки не розпізнавання відмови двох вузлів; в – грубі помилки

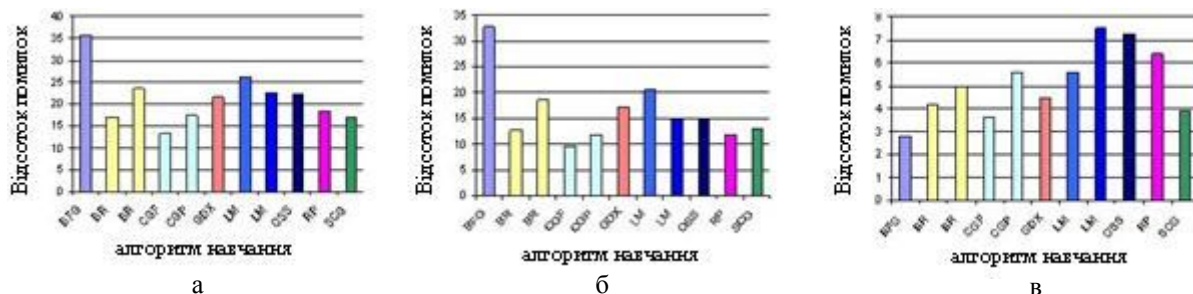


Рис. 4. Результати тестування на якість розпізнавання ПВ:

а – помилки класифікації; б – помилки не розпізнавання відмови двох вузлів; в – грубі помилки

Щодо швидкості навчання на початковому етапі, коли обмежений час навчання, то за ефективністю алгоритми розміщуються в такому порядку:

1 – CGF, 2 – RP, 3 – CGP,  
4 – CGB, 5 – LM,  
6 – BFG, 7 – OSS.

Інша картина просліджується з результатами розпізнавання за ПВ (рис. 4). За якістю розпізнавання алгоритми розміщуються в порядку CGF, CGP, SCG, BR, RP, GDX, LM, OSS, BFG. Але в цьому разі на якість розпізнавання впливає те що стан ГТД змінився і це відбулося в дещо іншому напрямку, що було зафіксовано в процесі навчання за НВ, хоча генеральний напрям змін залишився.

Незважаючи на наведені на рис. 4 результати, все ж таки у подальшому при визначенні кількості шарів та функції активації, саме алгоритм LM надає найбільш ефективні результати.

### Вибір кількості шарів мережі та ФА нейронів

Наступним етапом побудови архітектури НМ є визначення кількості шарів. Основним принципами при цьому є те, що кількість нейронів вхідного шару повинна бути не меншою ніж кількість ознак, які характеризують стан об'єкту, а кількість нейронів вихідного шару повинна дорівнювати кількості класів технічного стану об'єкту розпізнавання. НМ набувала кращих якостей якщо кількість нейронів інших (проміжних) шарів була не меншою за кількість нейронів вихідного шару. Апробація проводилася для 2, 3, 4 та 5-ти шарової НМ. Для 2-х шарової мережі (11,16) для підвищення якості розпізнавання оптимальна кількість нейронів першого шару по-

винна бути більшою за кількість вхідних ознак відсотків на 30 %. Якість також зростала при невеликому рості кількості нейронів мережі в середніх шарах. Для 3-х шарової мережі (7,16,16) для НВ кількість помилок значно зменшилась. Найбільшу ефективність при розпізнаванні було отримано для 4-х шарової мережі при кількості нейронів (7,16,17,16), при менших значеннях шарів виникає більший відсоток помилок класифікації та помилок другого роду, що є неприпустимими, для 5-ти шарової мережі спостерігався ефект перенавчання при кількості нейронів (7,16,17,19,16) (рис. 5).

Вибір типу ФА нейронів був проведений для 3-х шарової мережі з прямим поширенням сигналу. Кількість нейронів у шарах була, відповідно рівною (7,16,16). Розгляду підлягали три типи ФА: гіперболічний тангенс (TANSIG), логістична (LOGSIG) та лінійна (PURELIN) у різних комбінаціях. При цьому в якості базового використовувався алгоритм LM. Порівняння ефективності різних комбінацій нейронів проводилося за ступенем адекватності мережі навчальному наборові даних. На рис. 6 приведені чотири найбільш характерні комбінації ФА з  $3^3=27$  можливих. Найкращими властивостями при розпізнаванні стану двигуна володіє функція активації Tansig, тому комбінація ФА Tansig-Tansig-Tansig є найкращою, але непогані властивості також мають інші комбінації в т.ч. ФА Tansig-logsig-purelin (рис. 6).

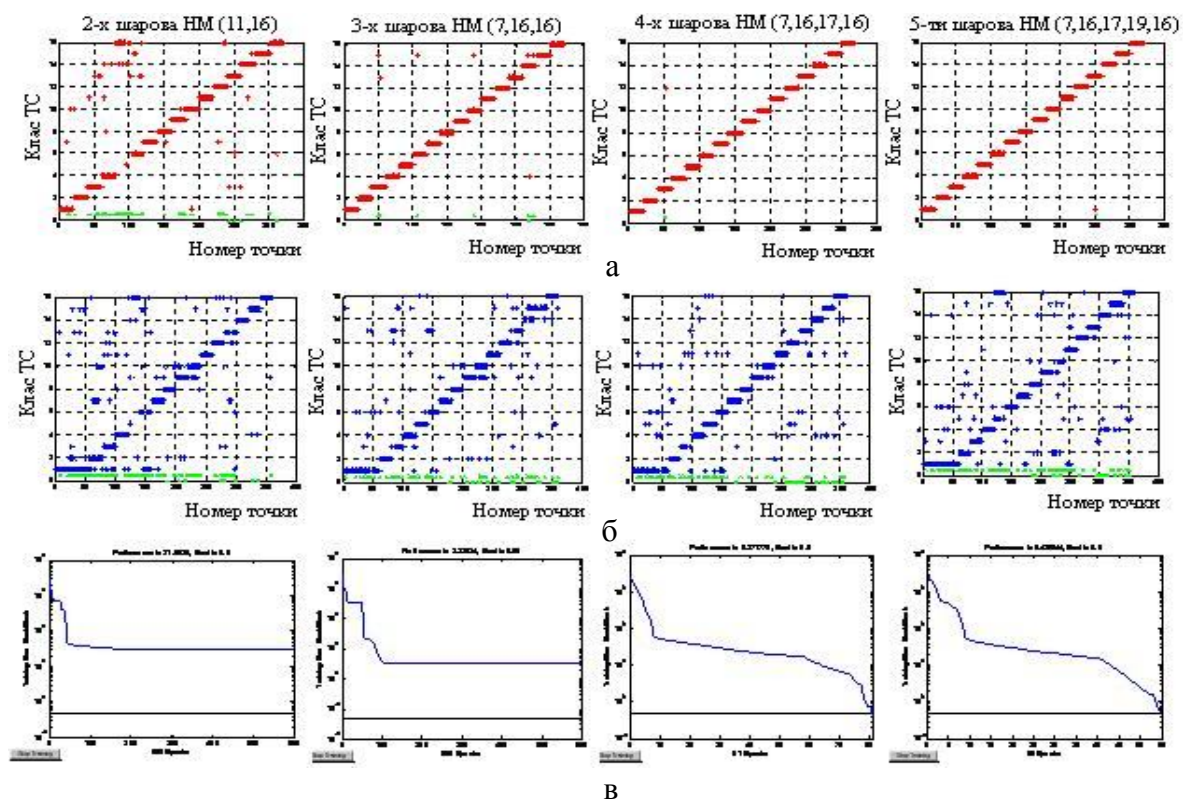


Рис. 5. Результат класифікації багатошарових НМ:  
а – НВ; б – ПВ; в – функціонал помилки

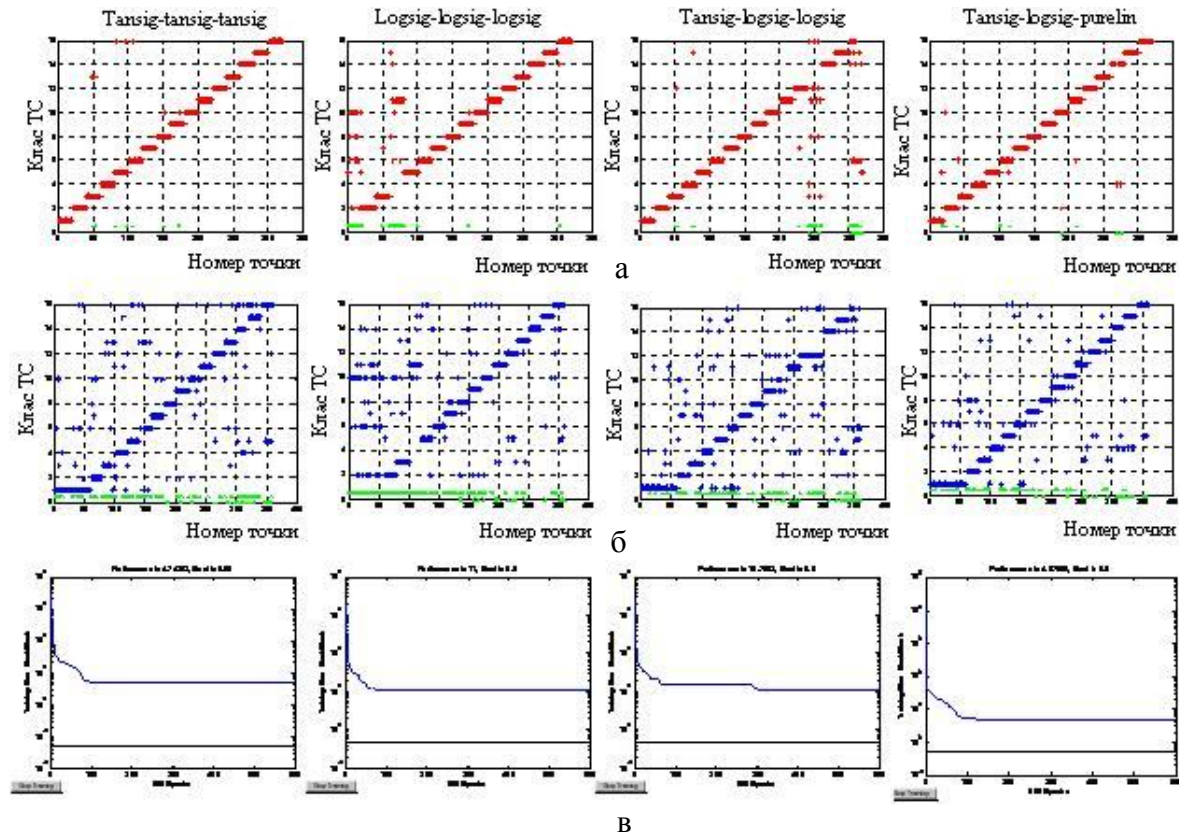


Рис. 6. Результат класифікації трьохшарової мережі з різними функціями активації:  
а – НВ; б – ПВ; в – функціонал помилки



Рис. 7. Послідовність уточнення структури НМ

Проведений аналіз показав, що в першому шарі завжди повинні стояти ФА Tansig в другому можлива ФА logsig і на третьому останньому можлива ФА purelin.

### Визначення ефекту перенавантаження нейронної мережі

На наступному етапі роботи було виконано спробу розробити метод оцінки виникнення явища

перенавантаження нейронної мережі. Для цього використано метод, описаний у загальному вигляді у роботі [12]. Цей метод полягає у порівнянні якості розпізнавання навченою мережею навчального набору даних, за яким проводилося навчання, та окремого тестового набору, який не приймав участі у процесі навчання але взятий з однієї генеральної сукупності.

Алгоритм отримання тестового набору аналогічний алгоритму формування навчального набору. Єдиною відмінністю цих наборів є кількість точок,

що репрезентують справний клас ТС. У тестовому наборі їхня кількість збільшена до 60 проти 20 у навчальному. Перевірочний набір не може слугувати цим набором так як умови формування НВ та ПВ різні. Тестовий набір формується з характеристиками НВ.

Загальний алгоритм оптимізації структури НМ зображений на рис. 7.

## Висновки

Представлений метод дозволяє побудувати ефективну процедуру навчання нейронної мережі з оптимальною структурою для розпізнавання класу ТС ГТД.

За функцію активації в такій мережі доцільно використовувати функцію гіперболічного тангенса але можливо використання в кінцевих шарах і логістичну або лінійну функцію, для формування архітектури нейронної мережі необхідно використовувати процедури визначення оптимальної кількості шарів мережі та кількості нейронів в кожному шарі, а для навчання мережі – алгоритми:

- Лавенберга-Маркварта,
- регуляризації Bayesian,
- Полака-Рібейри,
- градієнтний алгоритм зворотного розповсюдження помилки.

Приведені дані дозволяють визначити критерій, за допомогою якого виявляється ефект перенавчання.

## Література

1. Кучер А.Г. Определение технического состояния ТРДД по данным экспериментальных исследований с использованием нейронных сетей и методов распознавания образов / А.Г. Кучер, С.А. Дмитриев, А.В. Попов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2007. – № 10/46. – С. 153-164.
2. Комплексний метод розпізнавання стану ТРДД з використанням нейронних мереж та методів розпізнавання образів / О.Г. Кучер, С.О. Дмитрієв, О.В. Попов, О.В. Тишкевич // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 10/57. – С. 51-61.
3. Дмитрієв С.О. Оцінка технічного стану проточної частини газотурбінного двигуна за параметрами робочого процесу / С.О. Дмитрієв, О.Г. Кучер, О.В. Попов // *Вісник Інженерної академії України*. – Миколаїв, 2009. – № 1. – С. 8-11.

4. Многокритериальное диагностирование проточной части авиационного газотурбинного двигателя / А.Г. Кучер, С.А. Дмитриев, А.В. Попов, А.С. Якушенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2009. – № 8/65. – С. 153-158.

5. Кучер О.Г. Розпізнавання технічного стану авіаційних ГТД з використанням нейронних мереж / О.Г. Кучер, О.С. Якушенко, В.Ю. Сухоруков // *Вісник двигунобудування*. – 2002. – № 1. – С. 101-106.

6. Кучер О.Г. Оптимизация метода обучения нейронной сети для распознавания класса технического состояния ГТД / О.Г. Кучер, О.С. Якушенко, В.Ю. Сухоруков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 1/15. – С. 184-188.

7. Дмитрієв С.О. Параметричне оцінювання технічного стану проточної частини газотурбінного двигуна / С.О. Дмитрієв, О.Г. Кучер, О.В. Попов // *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «ПРТК-2009»* – К.: НАУ, 2009. – С. 107-108.

8. Використання штучного інтелекту при вирішенні завдань діагностування авіаційних газотурбінних двигунів / С.О. Дмитрієв, О.Г. Кучер, О.В. Попов, І.А. Слепухіна // *Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції „ABIA – 2009”*. – К.: НАУ, 2009. – Т. 2. – С. 17.29-17.32.

9. Дмитриев С.А. Диагностирование проточной части авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя на примере АИ-25 / С.А. Дмитриев, А.В. Попов // *Матеріали міжнародної наукової конференції ISDMCI 2009, 18-22 травня*. – Херсон: ХНТУ, 2009. – С. 509-511.

10. Вибір компонентів і параметрів нейронної мережі діагностики ТРДД / О.Г. Кучер, О.С. Якушенко, В.Є. Мільцов, В.М. Охмакевич // *Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції „ABIA – 2009”*. – К.: НАУ, 2009. – Т. 2. – С. 13.5-13.7.

11. Якушенко О.С. Нейронні мережі для діагностування газотурбінних двигунів / О.С. Якушенко // *Вісник НАУ*. – К., 2004. – № 2 (20). – С. 67-71.

12. Медведев В.С. Нейронные сети. Matlab 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

13. Первинна оптимізація архітектури нейронної мережі діагностування ТРДД // О.Г. Кучер, О.С. Якушенко, В.М. Степаненко, В.Є. Мільцов // *Вісник двигунобудування*. – 2009. – № 3. – С. 166-171.

14. Двигатель ПС-90А. Руководство по технической эксплуатации. В 3-х книгах. – Пермь: ПНПО "Авиадвигатель", 1990.

Надійшла в редакцію 30.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., декан механіко-енергетичного факультету В.В.Панін, Національний авіаційний університет, Київ.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРДД

*А.Г. Кучер, С.А. Дмитриев, А.В. Попов, А.С. Якушенко*

Рассмотрены вопросы построения эффективной процедуры обучения и оптимальной структуры нейронной сети для диагностирования конструктивных узлов проточной части газотурбинного двигателя. При этом решаются задачи уточнения структуры, выбора алгоритма обучения с тестированием по критериям скорости обучения, качества распознавания по учебной и проверочной выборкам и по изменению функционала ошибки. В итоге, авторами разработана методика оптимизации структуры нейронной сети с целью избегания эффекта «переобучения» сети при решении задач параметрической диагностики авиационного газотурбинного двухконтурного двигателя.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, обучение сети, диагностирование, оптимизация структуры, количество нейронов, критерий адекватности, переобучение сети.

## METHOD OF DETERMINATION OPTIMUM ARCHITECTURE OF NATURAL NETWORK OF BPE DIAGNOSTICS

*O.G. Kucher, S.O. Dmitriev, O.V. Popov, A.C. Yakushenko*

In this article are consider questions of construction effective procedure of teaching and optimum natural network structure for diagnosticating of structural units of flowing part of turbo-engine. The tasks of classification of structure decide thus, choice of teaching algorithm with testing on the criteria of teaching speed, qualities of recognition on educational and verification selections and on the change of functional of error. In the total, authors are develop the method of optimization of natural network structure with the purpose of avoidance of effect of «overteaching» of network at the decision of tasks of self-reactance diagnostics of aviation by-pass engine.

**Keywords:** natural network, teaching of network, diagnosticating, optimization of structure, amount of neurons, criterion of adequacy, overteaching of network.

**Кучер Олексій Григорович** – д-р техн. наук, проф. кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: kucher@nau.edu.ua.

**Дмитрієв Сергій Олексійович** – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри збереження льотної придатності авіаційної техніки Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: sad@nau.edu.ua

**Попов Олександр Вікторович** – канд. техн. наук, доцент кафедри збереження льотної придатності авіаційної техніки Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: popche@ukr.net.

**Якушенко Олександр Сергійович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: yuyss@mail.ru.

УДК 681.518.54:621.45

**В.Е. АФАНАСЬЕВСКАЯ, О.С. РАДИВОНЕНКО, А.Ю. СОКОЛОВ, М.Л. УГРЮМОВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Представлен аналитический обзор методов классификации дефектов, которые могут возникнуть в функциональных элементах сложных технических систем, таких как авиационные двигатели, и привести к отказу системы во время функционирования. Предложен метод нечеткой кластеризации для решения задачи распознавания или классификации дефектов в рамках допускового контроля, результат которой необходим для верной локализации дефектов и определения состояния системы в целом. Рассмотрен пример реализации данного метода при решении задачи диагностики состояния авиационных двигателей.*

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, техническая диагностика, допусковый контроль, классификация дефектов, классы состояния, нечеткая кластеризация.

### **Введение**

При эксплуатации технических систем, таких как авиационные двигатели, приоритетной является задача обеспечения надежности их работы. Повышение сложности технических систем приводит к возрастанию количества возможных дефектов и вероятности их появления во время функционирования. Дефекты могут происходить одновременно в различных местах объекта контроля, иметь неоднородный характер и вызывать эффект наложения. Поэтому проблема своевременной локализации дефектов, которые могут привести к отказам, является актуальной.

Для решения сформулированной проблемы используют методы анализа технических систем на основе обработки данных, полученных регистрацией параметров процессов в функциональных элементах системы. Среди этих методов можно выделить методы допускового контроля и тренд-анализ.

Допусковый контроль включает такие задачи, как формирование диагностических признаков, построение диагностической модели, определение интервалов значений симптомов, классификация дефектов и их локализация.

Для их решения широко применяются методы построения нечетких моделей, регрессионные методы, методы интервального анализа, методы кластерного анализа и др. [1].

Методы тренд-анализа, методы экспертных оценок, искусственные нейронные сети и др. используют при решении задач прогнозирования технического состояния системы на основе полученных временных рядов [2].

Целью данной работы является разработка метода нечеткой кластеризации для решения задачи классификации в технической диагностике авиационных двигателей в рамках допускового контроля.

### **1. Постановка задачи**

Переходу технической системы из исправного состояния в неисправное соответствуют индивидуальные для каждого отказа значения измеряемых параметров, однако при допусковом контроле используется единый вектор осредненных допусков. Поэтому проверка исправности двигателя по допускам ведет к ошибкам распознавания даже при абсолютно точном измерении вектора осредненных допусков. Аналогично, анализ тенденций измерения каждого контролируемого параметра в отдельности ведет к повышению вероятности ошибки при выявлении тренда и снижению надежности прогноза.

Под классом состояний технической системы понимают один из видов неисправностей, развивающихся от их зарождения до границ работоспособности. Каждый из классов включает исправное и неисправное состояние, и отнесение текущего состояния системы к одному из этих классов еще не означает ее неисправность, а лишь указывает на направление ее развития. В задаче контроля выделяется два класса: исправных и неисправных состояний. Природа параметров состояния и связей между ними – стохастическая, вследствие действия большого количества случайных факторов. Поэтому текущее состояние может быть результатом проявления любого класса, а определение истинного состояния системы в пространстве параметров представляет

задачу распознавания образов, включающую локализацию дефектов и контроль неисправности.

Задача классификации в технической диагностике требует учета интуитивных понятий человека о классах дефектов. Поэтому при распознавании дефектов, приводящих к отказам авиационных двигателей, используют кластерный анализ, основанный на структурном подходе к решению проблемы классификации многомерных объектов.

Требования однозначной классификации оказываются чрезмерно жесткими при анализе сложных технических систем. Применение аппарата нечеткой логики к задачам автоматической классификации позволяет осуществить более содержательное представление данных, подлежащих классификации, снять или смягчить ограничения, проистекающие из априорных предположений о структуре данных, более адекватно представить объекты, находящиеся вне типичной части каждого кластера.

Кластеризацию проводят для объектов с количественными, качественными или смешанными признаками. Данные обычно представляют собой наблюдения некоторых физических процессов. Каждое наблюдение состоит из  $n$  измерений, сгруппированных в  $n$ -мерный вектор-столбец

$x_j = [x_j^1, \dots, x_j^n]^T$ ,  $x_j \in \mathbb{R}^n$ . Множество, состоящее из

$q$  наблюдений, обозначают  $X = \{x_j | j = 1, 2, \dots, q\}$ .

Таким образом, исходной информацией для кластерного анализа является матрица наблюдений, представленная в виде:

$$X = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_q^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_q^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & x_q^n \end{pmatrix}.$$

На основе матрицы наблюдений  $X$ , полученной для выбранного сценария работы, необходимо данные разделить на два класса: исправных и неисправных состояний авиационного двигателя.

## 2. Методы кластерного анализа

В литературе рассмотрено множество методов кластерного анализа. Так как кластеры формально можно представить в виде подмножеств некоторого множества данных, одним из возможных признаков классификации методов кластерного анализа может быть условие, являются ли подмножества нечеткими или четкими. Четкие методы кластеризации базируются на классической теории множеств и требуют, чтобы объект либо принадлежал, либо не принадлежал кластеру [3]. Четкая кластеризация

означает разбиение данных на определенное количество непересекающихся подмножеств. Методы нечеткой кластеризации позволяют объектам принадлежать нескольким кластерам одновременно, с различными степенями принадлежности [3]. Во многих ситуациях нечеткая кластеризация более естественна, так как объекты, находящиеся на границах нескольких кластеров не связываются отношением полной принадлежности лишь с одним из классов, а получают степень принадлежности в интервале от нуля до единицы, что свидетельствует об их частичной принадлежности. Дискретная природа четкого разбиения также может привести к алгоритмической сложности в тех случаях, когда алгоритмы основаны на аналитических функционалах, и эти функционалы недифференцируемы.

Существуют три основных подхода к проведению процедур кластеризации: иерархический, оптимизационный и эвристический. На основании приведенной классификации проведем анализ методов кластерного анализа, основанных на использовании нечеткой логики.

Агломеративные иерархические методы и методы иерархического разделения [4] формируют новые кластеры путем смены принадлежности одной точки за раз на основе некоторой меры сходства. Эвристические методы осуществляют разбиение с помощью методов теории графов, матрица  $X$  представляется как множество вершин, причем веса ребер между парами вершин зависят от значения меры сходства между этими вершинами. Третий класс алгоритмов кластерного анализа использует целевую функцию для поиска желаемого разделения. Для поиска локального экстремума целевой функции используются алгоритмы нелинейной оптимизации. Методы кластерного анализа с использованием целевой функции ведут к решению задач оптимизации методом типа наименьших квадратов, следовательно, существует близкая взаимосвязь между кластеризацией с помощью нечеткой целевой функции, методами идентификации систем и статистической регрессии. Дифференцируемость целевой функции при нечеткой кластеризации является весьма полезным свойством для решения задач оптимизации.

Оптимизационный подход является наиболее общим и распространенным направлением нечеткого кластерного анализа. При этом нечеткая кластеризация понимается как разбиение исходной совокупности данных на нечеткие множества, причем в качестве входного параметра задается число нечетких кластеров, которые описываются матрицей нечеткого разбиения.

Нечеткое разбиение позволяет просто решить проблему объектов, расположенных на границе двух

кластеров – им назначают степени принадлежности равные 0.5. Недостаток нечеткого разбиения проявляется при работе с объектами, удаленными от центров всех кластеров. Для устранения этого недостатка используется возможностное разбиение, которое требует, только чтобы произвольный объект из  $X$  принадлежал хотя бы одному кластеру.

Для нечеткой классификации дефектов был применен метод Fuzzy C-means (FCM) – нечетких К-средних.

### 3. Метод нечетких К-средних

Метод FCM [5] относится к приближенным методам поиска экстремума целевой функции при наличии ограничений.

В результате выполнения алгоритма определяется локально-оптимальное нечеткое разбиение, которое описывается совокупностью функций принадлежности, а также центры (типичные представители) каждого из нечетких кластеров.

Суть метода состоит в предположении о том, что искомые кластеры представляют собой нечеткие множества, образующие нечеткое покрытие исходного множества объектов кластеризации  $\tilde{P} = P$ . Значения функций принадлежности ограничены диапазоном (0..1). Сумма всех функций принадлежности каждого компонента по всем классам равна единице

$$\sum_{k=1}^c \mu_{P_k}(p_i) = 1, (\forall p_i \in P). \quad (1)$$

где  $c$  – количество кластеров.

Для каждого искомого нечеткого кластера вводится понятие центра

$$v_j^k = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{P_k}(p_i))^m \cdot x_j^i}{\sum_{i=1}^n (\mu_{P_k}(p_i))^m}, (\forall k \in \{2, \dots, c\}, \forall p_i \in P), \quad (2)$$

где  $m$  – экспоненциальный вес нечеткой кластеризации ( $m \in \mathbb{R}, m > 1$ ), значение которого задается в зависимости от мощности множества  $P$ . Чем больше элементов содержит множество  $P$ , тем меньшее значение выбирается для  $m$ .

Целью нечеткой кластеризации является отыскание функций принадлежности для каждого класса таких, которые обеспечивают кластеризацию вокруг центров каждого класса. Таким образом, метод FCM может быть представлен как минимизация целевой функции, представленной в виде суммы квадратов взвешенных отклонений координат объектов кластеризации от центров искоемых нечетких кластеров:

$$F(P_k, v_j^k) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c (\mu_{P_k}(p_i))^m \sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^k)^2. \quad (3)$$

Целевая функция является минимизированной, когда большие значения функций принадлежности соответствуют компонентам, близким к центру класса. Это проблема нелинейна и решается итеративно. В каждой итерации получают новое множество функций принадлежности и центров классов.

Алгоритм решения задачи можно представить в виде следующей последовательности шагов:

1. Задание количества искоемых нечетких кластеров  $c, (c \in \mathbb{N}, c > 1)$ , максимального количества итераций  $s, (s \in \mathbb{N})$ , параметра сходимости алгоритма  $\varepsilon, (\varepsilon \in \mathbb{R}_+)$ , экспоненциального веса  $m$  целевой функции и центров кластеров. Задание исходного нечеткого разбиения  $\tilde{P}$  на  $c$  непустых нечетких кластеров путем присваивания значений функциям принадлежности  $\mu_k(p_i), (\forall k \in \{2, \dots, c\}, \forall p_i \in P)$ .

2. Вычисление центров нечетких кластеров (2) для текущего нечеткого разбиения, вычисление значения целевой функции (3).

3. Формирование нового нечеткого разбиения  $\tilde{P}$  исходного множества кластеризации  $P$ , характеризуемое совокупностью функций принадлежности  $\mu'_k(p_i), (\forall k \in \{2, \dots, c\}, \forall p_i \in P)$

$$\mu'_k(p_i) = \left( \frac{\sum_{j=1}^q \left( \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^k)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^1)^2}} \right)^{\frac{2}{m-1}}}{\sum_{k=1}^c \left( \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^k)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^1)^2}} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

4. Повторение шагов 2 и 3 до обеспечения сходимости алгоритма, либо до достижения наперед заданного количества итераций  $s$ . Сходимость достигнута, когда максимальное изменение функций принадлежности всех кластеров между двумя итерациями меньше, чем наперед заданная малая величина  $\varepsilon$ .

### 4. Пример нечеткой кластеризации для диагностирования АД

Для моделирования множества признаков состояния использовалась линейная однорежимная диагностическая модель первого уровня сложности

$$\delta Y = H \delta \Theta. \quad (5)$$

Рассмотрим сценарий, при котором отказ системы вызван эрозийным износом проточной части

компрессора, приводящим к изменению расхода воздуха и КПД компрессора высокого давления.

В качестве экспериментальных данных был смоделирован множественный (двукратный) дефект

$$\delta Y = H\delta G_{\text{КВД}} + H\delta\eta_{\text{КВД}} \quad (6)$$

В качестве относительных отклонений параметров состояния  $\delta\Theta$  был использован массив случайных величин, распределенных по равномерному закону на интервале (0,1).

С помощью модели (6) была получена матрица наблюдений  $X$ , содержащая  $10 \times 100$  значений пара-

метров проточной части, состоящий из 100 наблюдений, среди которых были включены значения с дефектами.

Далее с использованием этих данных была проведена процедура нечеткой кластеризации (методом fuzzy c-means).

В результате было выделено два класса, соответствующих исправному и неисправному состояниям.

На рис. 1 представлены два класса состояний системы в пространстве симптомов для выбранного сценария отказа авиационного двигателя.

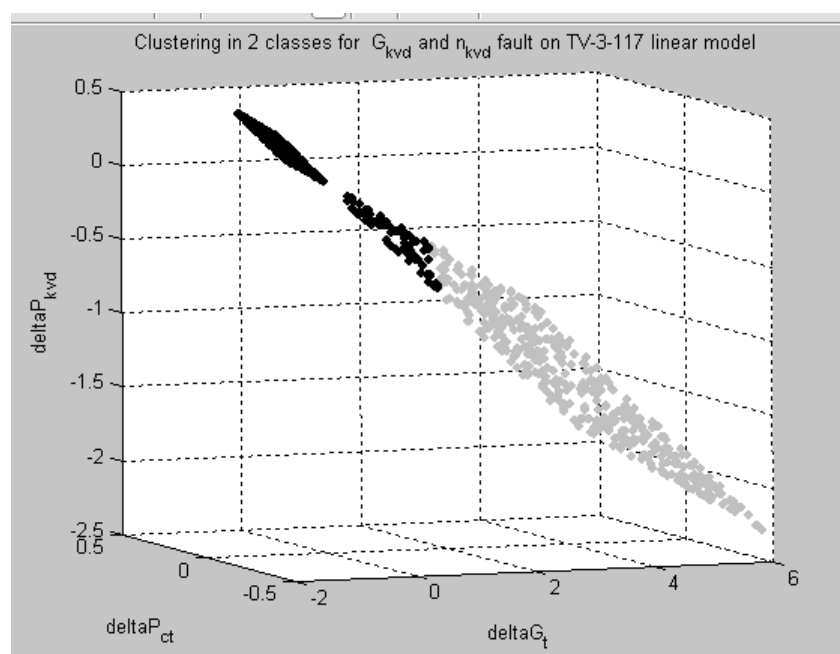


Рис. 1. Результат кластерного анализа

## Заключение

На основе анализа литературы показано, что задача классификации (кластеризации) обычно возникает при анализе данных для идентификации состояния технических систем, решение которой может быть найдено, например, с помощью аппарата теории искусственных нейронных сетей или вероятностных методов.

Рассмотрены постановка и методы решения задачи классификации отказов в технической диагностике авиационных двигателей.

Предложен метод нечеткой кластеризации для решения задачи классификации. На основе линейной диагностической модели и матрицы наблюдений, используя метод нечетких К-средних, были выделены два класса состояний, соответствующих выбранному сценарию отказа авиационного двигателя.

## Литература

1. Биргер И.А. *Техническая диагностика* / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Епифанов С.В. *Синтез систем управления и диагностирования ГТД* / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
3. Babuska R. *Fuzzy modeling for control* / R. Babuska. – Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publishers, 1998. – 232 p.
4. Мандель И.Д. *Кластерный анализ* / И.Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
5. Pal N.R. *On cluster validity for the fuzzy c-means model* / N.R. Pal, J.C. Bezdek. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions*. – Volume 3, Issue 3, Aug 1995. – P. 370-379.

Поступила в редакцию 14.05.2010

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф., заведующий каф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ  
ПІД ЧАС РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТИКИ  
АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ**

***В.Є. Афанасьєвська, О.С. Радівоненко, О.Ю. Соколов, М.Л. Угрюмов***

Подано аналітичний огляд методів класифікації дефектів, які можуть виникнути у функціональних елементах складних технічних систем, таких як авіаційні двигуни, й привести до відмови системи під час функціонування. Запропоновано метод нечіткої кластеризації для розв'язання задачі розпізнавання (класифікації) дефектів в межах допускового контролю, результат якої є необхідним для вірної локалізації дефектів та визначення стану системи в цілому. Розглянуто приклад реалізації даного методу для розв'язання задачі діагностики стану авіаційних двигунів.

**Ключові слова:** авіаційних двигун, технічна діагностика, допускний контроль, класифікація дефектів, класи станів, нечітка кластеризація.

**FUZZY CLUSTERING METHODS APPLICATION  
BY AIRCRAFT ENGINE DIAGNOSTICS  
PROBLEMS SOLUTION**

***V.E. Afanasjevska, O.S. Radivonenko, A.Yu. Sokolov, M.L. Ugryumov***

The analytical review of classification methods of defects, which can appear in the functional elements of complex technical systems such as aircraft engine and lead to system's faults in time of operation, is represented. The fuzzy classification methods for defects recognition or classification problem solution within the bounds of tolerancing are offered. The result of this problem is need for correct fault localization and system state identification in whole. The example of present method realization for aircraft engine state diagnostic problem solution is considered.

**Key words:** aircraft engine, technical diagnostic, tolerancing, fault classification, state class, fuzzy clusterization.

**Афанасьєвская Виктория Евгеньевна** – аспирант кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Радивоненко Ольга Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Соколов Александр Юрьевич** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Угрюмов Михаил Леонидович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

УДК 621.452.3:681.518.54

**В.П. ГЕРАСИМЕНКО, С. КАЕМИАН***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПОУЗЛОВОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД**

*Рассмотрены основные проблемы диагностирования газотурбинного двигателя при эксплуатации по техническому состоянию. Описаны главные причины ухудшения технического состояния проточной части компрессора и турбины. Установлено, что КПД является наиболее удобной характеристикой для оценивания технического состояния двигателя и его узлов. Предложено оценивать техническое состояние ГТД по относительному изменению КПД узлов. Этот критерий позволяет поузловое диагностирование. Представлены зависимости характеристик двигателя по статическим и полным параметрам.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, техническое состояние, диагностика, КПД.

**Введение**

Непрерывная тенденция увеличения параметров цикла авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ) с целью повышения удельных параметров и экономичности сопровождается одновременным усложнением конструкции их узлов и систем охлаждения горячих деталей при росте нагрузок на ответственные несущие элементы. Естественно, что подобные изменения приводят к ужесточению требований по качеству эксплуатации. Вместе с тем эксплуатация по техническому состоянию (ТС) ГТД [1] является основной стратегией как прогрессивное направление снижения эксплуатационных расходов, в том числе за счёт более полного исчерпания ресурса. При этом такая стратегия не должна приводить к повышению риска создания аварийных ситуаций, что требует значительного увеличения количества контролируемых параметров, внедрения автоматизированных систем диагностирования неисправностей и создания средств прогнозирования возможных отказов [2].

**1. Формулирование проблемы**

Для оценки технического состояния ГТД в эксплуатации применяют различные диагностические признаки – критерии, значения которых разделяют на классы – уровни для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя. При поузловой классификации состояний ГТД число классов зависит от количества узлов. Учёт влияния неисправностей проводят по матрице состояний, число строк в которой равно количеству контролируемых параметров, а число столбцов – количеству возможных состояний двигателя [3]. Здесь

решающим критерием для оценки технического состояния используется величина среднего риска.

Выбор критериальных признаков и установление их пороговых значений при параметрическом диагностировании ГТД составляет одну из ключевых методических задач. Несмотря на существенные отличия условий эксплуатации двигателей в авиации в сравнении с наземными ГТУ общие подходы в оценивании их технического состояния могут совпадать ввиду одинакового характера изменений в проточной части, например, при её загрязнении или эрозионном износе деталей из-за наличия пыли в воздухе [4, 5]. В обоих случаях при наличии кварцевой пыли в воздухе происходит износ рабочих лопаток компрессора по передней кромке в периферийной части с эрозией концов лопаток, что приводит к увеличению радиального зазора в направлении задней кромки до трёхкратного значения [4], и как следствие – к линейному снижению КПД компрессора и сужению диапазона устойчивой работы двигателя. При наличии лессовой пыли происходит её спекание на горячих деталях при температуре более 900°C. Это приводит к загромождению межлопаточных каналов особенно первого соплового аппарата турбины и к изменению режима работы двигателя. В охлаждаемых лопатках турбин происходит засорение каналов и отверстия охлаждающего воздуха с ухудшением охлаждения. Визуальный контроль проточной части ГТД в сочетании с параметрическим диагностированием являются общепринятыми составляющими регламентных работ практически во всех отраслях применения ГТД. Поэтому новые предложения в данных направлениях способствуют повышению эффективности их эксплуатации. Ограничения в количестве измеряемых параметров штатной системой контроля ГТД могут быть преодолены применением специальных методик [6, 7].

Компрессор и турбина ГТД являются основными узлами, техническое состояние которых больше всего изменяется в подобных условиях. При этом их КПД – одни из информативных характеристик об этих изменениях. Особую значимость, как диагностические признаки, они приобретают в ГТД с высокими параметрами цикла. Поэтому для оценивания технического состояния ГТД по параметрам потока в проточной части в качестве критерия ТС все чаще используют КПД его узлов [6]:

$$\eta_k = \frac{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1}{T_k^* / T_B^* - 1},$$

где  $\pi_k = P_k / P_B$  – степень повышения статического давления в компрессоре;  $T_B^*$ ,  $T_k^*$  – полные температуры воздуха на входе и выходе из компрессора, соответственно;  $k$  – показатель адиабаты воздуха;

$$\eta_{TK} = \frac{L_{TK}}{C_{pg} T_g^* (1 - 1 / \pi_{TK}^{\frac{k_g-1}{k_g}})},$$

где  $L_{TK}$  – работа турбины компрессора;  $C_{pg}$ ,  $k_g$  – теплоёмкость и показатель адиабаты газа;  $T_g^*$  – полная температура газа перед турбиной;  $\pi_{TK}$  – степень понижения статического давления в турбине.

Применение КПД, как наиболее чувствительной характеристики, при поузловом оценивании технического состояния наземных ГТУ является оправданным согласно многим прикладным публикациям и отраслевым стандартам.

## 2. Результаты исследования

Целью данной статьи является распространение относительного изменения КПД узлов ГТД для оценивания их технического состояния [6]

$$K_\eta = \frac{\eta_n}{\eta_{нб}}, \quad (1)$$

где  $\eta_n$ ,  $\eta_{нб}$  – фактическое и исходное-базовое значения КПД, соответственно, на номинальном режиме работы ГТД. Применение точечного квадратичного аппроксимирования зависимостей КПД от режимного параметра  $\eta = f(X)$  позволяет исключить влияние последнего преобразовав формулу (1) к виду:

$$K_\eta = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{\eta}^i \bar{\eta}_0^i}{\sum_{i=1}^m (\bar{\eta}_0^i)^2}, \quad (2)$$

где  $\bar{\eta}^i = \eta^i / \eta_0$  – фактическое относительное значение КПД узла на  $i$ -м контрольном режиме;

$\bar{\eta}_0^i = \eta_0^i / \eta_{нб} = f_0(\bar{X}^i)$  – относительное значение КПД на базовой-исходной характеристике узла для  $i$ -го режима;  $\bar{X}^i = X^i / X_n$  – относительное значение режимного параметра на  $i$ -ом режиме;  $m$  – количество контрольных режимов.

Предложенный приём аппроксимирования, таким образом позволяет выделить эффект изменения КПД только из-за ухудшения технического состояния. Следуя алгоритмам [6,7] можно распространить методики оценивания технического состояния узлов на авиационные двигатели. При этом в качестве базовой характеристики узла  $\bar{\eta}_0 = f_0(\bar{X})$  используют зависимость по линии совместных режимов работы узлов в системе двигателя при соответствующей программе или законе регулирования.

Необходимо отметить, что ввиду использования штатных систем контроля параметров в проточной части двигателя по измерениям статических давлений и полных температур в характерных сечениях, то целесообразно изложить алгоритмы связи таких параметров с общепринятыми в практике проектирования ГТД по параметром торможения:

$$\pi_k^* = \pi_k \frac{P(\lambda_B)}{P(\lambda_K)}, \quad (3)$$

где отношение  $P(\lambda_B)/P(\lambda_K)$  легко определить из равенства расхода воздуха на входе и выходе из компрессора в форме Христиановича:

$$F_B \frac{P_B}{\sqrt{T_B^*}} \frac{q(\lambda_B)}{P(\lambda_B)} = F_K \frac{P_K}{\sqrt{T_K^*}} \frac{q(\lambda_K)}{P(\lambda_K)}. \quad (4)$$

Из этого выражения получим соотношение:

$$\frac{P(\lambda_B)}{P(\lambda_K)} = \frac{1}{\pi_K} \frac{F_B}{F_K} \sqrt{\frac{T_K^*}{T_B^*}} \frac{q(\lambda_B)}{q(\lambda_K)}, \quad (5)$$

где газодинамические функции  $q(\lambda_i)$  и  $P(\lambda_i)$  между собой однозначно связаны -  $y(\lambda_i) = q(\lambda_i)/P(\lambda_i)$ .

Отсюда имеем:

$$\frac{y(\lambda_K)}{y(\lambda_B)} = \frac{1}{\pi_K} \frac{F_B}{F_K} \sqrt{\frac{T_K^*}{T_B^*}}. \quad (6)$$

Определив  $y(\lambda_B)$  из уравнения  $y(\lambda_B) = \frac{G_B}{m_B F_B} \sqrt{\frac{T_B^*}{P_B}}$

и используя уравнение (6), находим  $y(\lambda_K)$ . Зная  $y(\lambda_K)$ , находим с помощью этой газодинамической функции значения  $\lambda_K$ . Аналогично можно определить и значения  $\lambda_B$ , которые позволяют определить величины  $P(\lambda_B)$  и  $P(\lambda_K)$ , а в конечном итоге –  $\pi_K^*$  по формуле (3). Несмотря на наличие такой связи параметров, позволяющей пересчет изменения технического состояния ГТД по параметрам торможения, точность оценок технического состояния узлов по статическим измеряемым давлением не снижается вви-

ду использования относительного КПД узлов (1) в качестве критериального признака. Добавим, что от технического состояния ГТД в значительной мере зависят также его экологические характеристики [8].

## Вывод

Таким образом, изложен один из возможных подходов поузлового оценивания технического состояния ГТД по измеряемым параметрам потока в проточной части штатными системами контроля в эксплуатационных условиях. Такой подход может быть применен как для наземных установок, так и для авиационных двигателей.

## Литература

1. Шереметьев А.В. Анализ опыта эксплуатации зарубежных газотурбинных двигателей по техническому состоянию / А.В.Шереметьев // *Авиационная техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2003. – Вып. 40/5. – С. 5-9.
2. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей / В.Ю. Арьков, Г.Г. Куликов, С.В. Епифанов, И.Ч. Минаев // *Авиационная техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2004. – № 7 (15). – С. 167-173.
3. Дмитриев С.А. Классификация состояния ГТД с глубиной диагностирования до узла / С.А. Дмитриев, Дж. К. Агарвал, Е.В. Путькин //

*Авиационная техника и технология: сб. науч. тр.* – Х.: ХАИ, 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 358-364.

4. Ухудшение характеристик турбовентильного и турбореактивного двигателя при работе в запыленной атмосфере / Данн, Падова, Моллер, Адамс // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 2. – С. 80-89.

5. Исследование поведения ГТД при наличии пыли в воздухе / Бачо, Моллер, Падова, Данн // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 2. – С. 90-100.

6. Герасименко В.П. Диагностика газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / В.П. Герасименко, С. Каемиян, Р.Р. Рузибаев // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»*: сб. науч. тр. – Х.: НТУ «ХПИ». 2010. – № 2. – С. 92-97.

7. Алгоритмы определения основных параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов в эксплуатации / В.П. Герасименко, Н.В. Кучерук, А.С. Мандра, Т.М. Нурмухаметов // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»*: сб. науч. тр. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 116-121.

8. Доновэн. Влияние окружающих условий на содержание загрязняющих веществ в выбросах газовых турбин. Обобщенные поправочные коэффициенты / Доновэн, Кэкетт // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки*. – 1988. – № 4. – С. 173-182.

Поступила в редакцию 28.05 2010

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

## ПОУЗЛОВЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТД

**В.П. Герасименко, С. Каєміан**

Розглянуті основні проблеми діагностування газотурбінного двигуна в експлуатаційних умовах за технічним станом. Описано головні причини погіршення технічного стану проточної частини компресора та турбіни. З'ясовано, що ККД є найбільш придатною характеристикою для оцінювання технічного стану двигуна та його вузлів. Запропоновано оцінювати ТС ГТД за відносним зміненням ККД вузлів. Цей критерій дозволяє поузлове діагностування двигуна. Наведені залежності характеристик двигуна за статичними та повними параметрами.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, технічний стан, діагностика, ККД.

## THE DIAGNOSTIC OF GTE UNITS BY TECHNICAL CONDITION

**V.P. Gerasimenko, S. Ghaemian**

Fundamental problems of Gas engine diagnostic by technical condition in exploitation have been considered. The main reason change for the worse of compressor and turbine channels technical condition have been written. At has been find out that units efficiency is best convenient characteristic for diagnostic of GTE units by technical condition. The technical condition GTE has been proposed estimate by change of the relative efficiency. The dependences of characteristics engine by rial flow parameters and stagnant flow parameters have been presented.

**Key words:** gasturbine engine, technical condition, diagnostic, efficiency.

**Герасименко Владимир Петрович** – д-р техн. наук, проф., проф. Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

**Каемиян Сайед** – магистр Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

УДК 681.518

А.Р. МИСЬКА, А.О. ДРАНКОВА, Н.И. МУХА

Одесская национальная морская академия, Украина

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

*Предлагаются основные элементы информационного подхода к созданию системы мониторинга технического состояния судовых дизель-генераторных установок на основе современных информационных технологий. Отмечены целевые установки и предпосылки реализации системы удаленного мониторинга судовых энергоустановок. Указаны основные ограничения и недостатки действующих систем мониторинга и диагностики судовых энергоустановок. Рассмотрены состав и назначение системы удалённого мониторинга, а также ожидаемые результаты ее реализации. Сформулированы основные направления развития систем удаленного мониторинга, применительно к судовым энергетическим установкам.*

**Ключевые слова:** техническая диагностика, мониторинг технического состояния, удаленный мониторинг, дизель-генераторная установка, информационные технологии

### Введение

Достижение высоких технико-экономических показателей эксплуатации технических объектов энергетического и транспортного назначения, к которым относятся, в частности, судовые дизельгенераторные установки (ДГУ), возможно не только за счет совершенствования проектных решений, но и более эффективным управлением их жизненным циклом. Такое направление предусматривает переход от принципов эксплуатации по назначенным ресурсным показателям к эксплуатации по техническому состоянию указанных объектов. Известные подходы к решению такой общей проблемы в отраслях высоких технологий [1, 2] должны быть использованы для решения важных практических задач и в других отраслях, а именно применительно к судовым энергетическим установкам. Решение указанной проблемы в настоящее время рассматривается на основе поэтапной реализации различных стратегий эксплуатации диагностируемых объектов по техническому состоянию [2].

### 1. Формулирование проблемы

Переход к эксплуатации энергетических объектов по их техническому состоянию требует разрешения концептуальных проблемных вопросов организации мониторинга такого состояния в необходимом объеме [3]. Наиболее важным вопросом является создание соответствующей информационной среды контроля и диагностирования объектов, позволяющей выполнить оценку технического состояния

с заданными вероятностными показателями. Достоверная оценка технического состояния (ТС) ДГУ в процессе их жизненного цикла должна быть обеспечена современными технологиями и техническими средствами диагностирования. Особенностью таких технологий применительно к судовым энергетическим объектам является перенос ответственности за решение диагностических задач на узкоспециализированную организацию. Указанная форма информационных технологий оценки технического состояния объектов энергетического и транспортного назначения получила название удаленного мониторинга [3] и широко используется передовыми фирмами. Центры удаленного мониторинга (ЦУМ) и диагностики созданы и успешно эксплуатируются ведущими зарубежными производителями энергетических установок, в частности: “General Electric” (Великобритания), “Mitsubishi” (Япония), “Siemens” (Германия), “Alstom” (Швейцария). Эти центры предлагают своим заказчикам широкий доступ к информации и техническим ресурсам, связанным с эксплуатируемым оборудованием.

Удаленный мониторинг позволяет повысить надёжность и достоверность диагностических выводов, обеспечивая организационную и методическую основу для решения проблемы эксплуатации оборудования по техническому состоянию, а в перспективе – по уровню функциональной надёжности [3].

Однако проблемные вопросы реализации информационных технологий удалённого мониторинга ещё далеки от своего решения. Во многом внедрение таких технологий сдерживается слабостью методологической базы, недостаточной обоснованно-

стью целевых установок и ожидаемых результатов, путей решения организационных и технических проблем, то есть вопросов, имеющих концептуальный характер. Использование новых технологий без комплексного решения возникающих задач может, в случае неудачи, дискредитировать новые подходы и создать негативные отношения к ним у заказчиков. Поэтому представляется актуальным рассмотреть основные подходы к мониторингу судовых ДГУ, который позволяет выполнить оценку их технического состояния, что и является целью настоящей работы.

## 2. Решение проблемы

Предлагаемый подход к организации мониторинга судовых энергоустановок включает ряд следующих взаимосвязанных составных частей.

### *Целевые установки*

1. Формирование единого информационного пространства, реализация мероприятий по созданию диагностических средств, каналов связи и центров удаленного мониторинга, создание необходимого методического, научного, алгоритмического и программного обеспечения.

2. Создание необходимой нормативной базы. Нормативной базой мониторинга являются государственные и отраслевые нормативные документы и стандарты, разрабатываемые нормативные документы.

3. Конечной целью реализации подхода является создание условий для эксплуатации судовых энергоустановок по техническому состоянию до выработки фактического ресурса при соблюдении экологических ограничений и при условии экономической целесообразности.

### *Предпосылки реализации системы удаленного мониторинга судовых энергоустановок*

1. Ограничения и недостатки действующих систем мониторинга и диагностики судовых энергоустановок.

Оценка технического состояния судовых энергоустановок, реально осуществляемая в настоящее время, имеет ряд системных недостатков:

- история каждой конкретной судовой ДГУ ведется в судовом журнале, что в значительной мере затрудняет оперативную оценку его технического состояния;

- не определен минимально необходимый состав параметров судовых ДГУ для решения диагностических задач, не определены необходимые минимальные интервалы дискретизации таких параметров, не до конца сформулированы требования к точности измерительных каналов;

- не определены требования к полноте, составу, точности математических моделей судовых ДГУ,

необходимость и возможность учёта индивидуальных особенностей конкретной установки в математической модели;

- не установлены требования к составу алгоритмического обеспечения по процедурам выделения трендов параметров судовых ДГУ и использования математических моделей;

- диагностическая информация должным образом не систематизируется и не доводится до производителей энергооборудования для выработки рекомендаций по изменению конструктивных решений.

По данным существующих систем, находящихся в эксплуатации, установить текущее реальное состояние судового энергооборудования практически не представляется возможным. Поэтому большинство ремонтов судовых ДГУ выполняется в соответствии с регламентом или после аварии.

2. Предпосылки к созданию технологий удалённого мониторинга:

- наличие и доступность современных информационных технологий сбора, обработки, передачи данных практически неограниченного объёма;

- наличие научного, научно-технического и методического задела по диагностированию состояния сложных объектов;

- наличие технико-экономических условий, обеспечивающих конкурентоспособность информационных технологий и услуг по удалённому мониторингу.

### *Состав и назначение системы удалённого мониторинга*

1. Информационная технология удалённого мониторинга организована по древовидной структуре в составе центра диагностики в специализированной организации и судовых систем аварийной сигнализации и мониторинга, связанных с центром цифровыми каналами связи (рис. 1). Коммуникационный канал удалённого мониторинга создаётся посредством организации выделенной линии на базе спутникового канала связи (КС). Возможен мобильный вариант реализации станций диагностики с обслуживанием оборудования в портах стоянки.

2. Судовая система мониторинга и диагностики состоит из рабочей станции диагностики, реализованной в виде программного изделия на соответствующей аппаратной платформе, и сервера обработки данных, связанных с центром и техническими средствами, установленными на ДГУ для решения локальных задач измерения, контроля параметров и управления каждой из установок – рис. 2.

Сервер обработки данных, выполненный на ПЭВМ промышленного типа, предназначен для сбора, первичной отработки, архивации параметров ДГУ. Сервер предоставляет также сетевые интер-

фейсы для удалённого доступа к диагностическим параметрам, результатам работы алгоритмов, к базам данных регистрации и другим диагностическим данным. Станция диагностики предоставляет оператору графический интерфейс к системе мониторинга и диагностики и, соответственно, интерфейс удалённого доступа к экрану оператора.

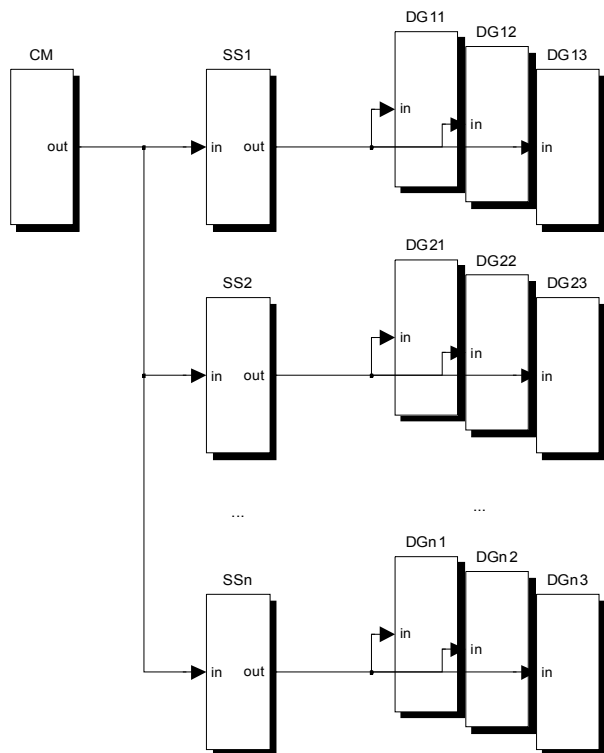


Рис. 1. Состав системы удалённого мониторинга

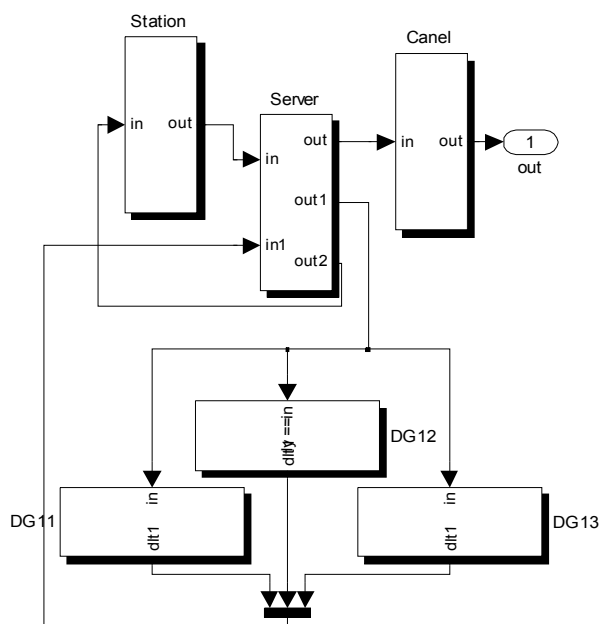


Рис. 2. Состав объектной системы мониторинга и диагностики

3. В центре диагностики устанавливаются удаленные терминалы, каждый из которых является полноценной рабочей станцией, которая путём удалённого подключения к сетевым интерфейсам сервера судовой системы мониторинга и диагностики даёт возможность наблюдать и диагностировать оборудование из центра.

*Ожидаемые результаты реализации удалённого мониторинга*

1. Реализация удалённого мониторинга позволит:

- повысить надёжность и достоверность диагностических выводов и рекомендаций;
- обеспечить разработчиков судовых дизель-генераторных установок объективной информацией об эксплуатационных характеристиках оборудования для своевременного внесения необходимых изменений;
- снизить вероятность аварийных ситуаций, внеплановых отключений и простоев, уменьшить экологический риск.

В целом предлагаемый информационный подход создаёт основу для реализации стратегий эксплуатации судовых ДГУ по техническому состоянию.

*Направления развития системы удалённого мониторинга.*

1. Аппаратные средства:

- совершенствование судовых систем аварийной сигнализации и мониторинга;
- совершенствование каналов связи;
- применение новых технологий диагностики (вихревых, электронных, SMART – датчиков и т.п.).
- применение сертифицированных технических средств.

2. Методы диагностирования:

- применение экспертных систем и технологий искусственного интеллекта;
- совершенствование математических диагностических моделей и на их основе методов долгосрочной диагностики трендов;
- разработка эффективных методов определения аномалий в фиксируемых временных рядах данных регистрации технического состояния судовых ДГУ.

3. Программное обеспечение:

- применение специализированных верифицированных и сертифицированных программных продуктов;
- адаптация к задачам мониторинга универсальных программных инструментов.

## Заключение

Представленные элементы информационного подхода к мониторингу судовых ДГУ могут быть расширены и детализованы, а также распространены и на другие судовые энергетические объекты и силовые установки, что составляет перспективу дальнейших разработок в данном направлении.

## Литература

1. Скибин В.А. Основные результаты научно-технической деятельности / В.А. Скибин, В.И. Со-

лонин, М.Я. Иванов // Труды ЦИАМ, в двух томах, 2001-2005. – М.: ЦИАМ, 2005.

2. Временное “Положение об установлении и увеличении ресурсов и сроков службы газотурбинных двигателей гражданской авиации, их агрегатов и комплектующих изделий” от 15.11.2005 г.

3. Концепция возможности построения удаленного мониторинга ГТД в составе силовых установок наземного применения / Т.Ю. Концевич, А.А. Филоненко В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2007. – Вып. 4 (40). – С. 49–54.

Поступила в редакцию 18.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры судовых энергетических установок С.А. Ханмамедов, Одесская национальная морская академия, Одесса.

## ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРІНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДОВИХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

*О.Р. Миська, А.О. Дранкова, М.Й. Муха*

Пропонуються загальні елементи інформаційного підходу до створення системи моніторингу технічного стану судових дизель-генераторних установок на підставі сучасних інформаційних технологій. Відзначені цільові установи та посилення реалізації системи віддаленого моніторингу судових енергоустановок. Вказані загальні обмеження та недоліки існуючих систем моніторингу та діагностики судових енергоустановок. Розглянуті склад та призначення системи віддаленого моніторингу, а також очікувані наслідки її реалізації. Сформульовані загальні напрямки розвитку систем віддаленого моніторингу, стосовно судових енергетичних установок.

**Ключові слова:** технічна діагностика, моніторинг технічного стану, віддалений моніторинг, дизель-генераторна установка, інформаційні технології

## INFORMATIONAL APPROACH TO MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF SHIP'S AUXILIARY DIESEL GENERATOR INSTALLATIONS

*A.R. Miska, A.O. Drankova, N.Y. Mukha.*

Propose the principal elements of informational approach to creation the monitoring system of technical condition of ship's auxiliary diesel generator installations on the basis of information technologies. Noted target configurations and background of the remote monitoring system of ships power installations. Designated the primal constraint and disadvantage of the operating monitoring system of ship's power installations. Considered the structure and function of remote monitoring system and presumable results of realization. Formulated the main directions of development the remote monitoring system in respect to ship's power installations.

**Key words:** technical diagnostics, monitoring of technical condition, remote monitoring, diesel generator installation, information technologies.

**Миська Александр Романович** – аспирант кафедры судовой электромеханики и электротехники Одесской Национальной морской академии, Одесса, Украина, e-mail: femire@onma.edu.ua.

**Дранкова Алла Олеговна** – доцент кафедры судовой электромеханики и электротехники Одесской Национальной морской академии, Одесса, Украина, e-mail: drankova64@mail.ru.

**Муха Николай Иосифович** – декан факультета электромеханики и радиоэлектроники Одесской Национальной морской академии, Одесса, Украина, e-mail: nm52@mail.ru.

УДК 681.518.54

В.Ф. МИРГОРОД<sup>1</sup>, Ю.В. ЧЕРКАСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Элемент», Одесса, Украина<sup>2</sup>ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## РЕГРЕССИОННЫЕ ФОРМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Для решения задач управления режимами по косвенным параметрам и контроля состояния применительно к бортовой аппаратуре предлагаются новые регрессионные формы математических моделей газотурбинных двигателей. Основой построения и реализации предлагаемых математических моделей является частичная замена моделируемых параметров ГТД на непосредственно измеряемые с высокой точностью, в частности, обороты турбин двигателя. При такой замене косвенно измеряемые параметры двигателя определяются регрессионными зависимостями от отклонений непосредственно измеряемых. Проведено компьютерное моделирование и сопоставление с данными летной эксплуатации.*

**Ключевые слова:** математическая модель, компьютерная реализация, газотурбинный двигатель

### Введение

Математические модели (ММ) газотурбинных двигателей (ГТД), применяемые на всех стадиях жизненного цикла двигателя, от ТЗ на разработку до оценки остаточного ресурса, достигли в настоящее время высокого уровня совершенства, позволяя расчетным путем получить значения косвенно измеряемых и неизмеряемых параметров ГТД. Проблемным вопросом является их достаточно высокий уровень алгоритмической сложности, что затрудняет компьютерную реализацию в наземных и бортовых средствах измерения, контроля параметров и управления авиационными двигателями. Поэтому отыскание новых форм ММ процессов управления и контроля, пригодных для использования в бортовых ЭСУ профиля FADEC, является актуальной проблемой, важной для решения прикладных задач повышения эффективности ЭСУ указанного типа.

### 1. Постановка проблемы и цель исследования

Применяемые ММ ГТД, в зависимости от назначения, разделяются на ряд типов [1]. Для моделирования процессов управления применяются преимущественно имитационные кусочно-линейные динамические модели (КЛДМ) [2, 3], являющиеся в настоящее время необходимой составной частью ТЗ на проектирование ЭСУ профиля FADEC. Имитационные модели ГТД используются в стендах-имитаторах, позволяя на этапе проектирования совершенствовать алгоритмы контроля состояния,

управления режимами и диагностики. Успешность применения КЛДМ обусловила разработку ряда их модификаций, среди которых наиболее важными представляются стохастические Марковские ММ [4] и ММ с неопределенными собственными значениями [5]. Компьютерно ориентированные ММ модальной формы и в виде интегральных уравнений Вольтера предложены в [6].

Принципиальным недостатком известных ММ является их итеративный характер, требующий значительных вычислительных ресурсов при компьютерной реализации. Другим недостатком известных ММ является значительное число входных параметров, измеряемых с различной точностью, что затрудняет интерпретацию результатов моделирования.

Таким образом, для решения задач моделирования процессов управления ГТД в масштабе времени, близком к реальному, требуется отыскание таких форм их математического описания, которые имеют безитеративный характер и используют наиболее достоверную априорную информацию, что и является целью настоящего исследования.

### 2. Основные результаты исследований

Идейной основой настоящего исследования является минимизация уровня априорной неопределенности при построении компьютерно ориентированных ММ процессов управления ГТД, что обеспечивает их рациональное упрощение при сохранении адекватности. Отправной точкой являются КЛДМ процессов управления, как наиболее совер-

шенные из имеющихся. Точность таких ММ определяется, во-первых, точностью задания статических (дрессельных) характеристик, во-вторых, точностью задания матриц в динамической модели пространства состояния, под которым понимается пространство угловых скоростей (оборотов) турбин. Если полагать, что КЛДМ являются адекватными моделями процессов управления, что подтверждается их успешным применением при проектировании ЭСУ и реализацией в стендах-имитаторах, то вполне естественным представляется такое направление их совершенствования, при котором уменьшается степень априорной неопределенности. Реализация такого направления связана, во-первых, с точным определением статических характеристик, индивидуализированных к конкретному экземпляру двигателя, во-вторых, с заменой в КЛДМ моделируемых оборотов турбин на их истинные значения, измеряемые, как известно, с высокой точностью.

Общепринятые КЛДМ ГТД имеют следующее описание.

Статическая модель задается в виде основных зависимостей, отражающих дрессельные характеристики двигателя

$$\bar{x}_{ст} = \bar{F}(\bar{S}), \quad (1)$$

где  $\bar{x}_{ст} = \text{col}[n_i, T_i, P_k, \pi_k, N]$ ;  $n_i$  – обороты турбин;  $T_i$  – температуры газов за ними;  $P_k$  – давление за компрессором;  $\pi_k$  – степень повышения давления;  $N$  – мощность либо тяга ГТД;  $\bar{F}$  – нелинейная вектор-функция;  $\bar{S}$  – вектор управляющих и возмущающих воздействий, основным из которых является расход топлива  $G_T$ .

Следует заметить, что модель (1) задается для приведенных к стандартным атмосферным условиям термогазодинамическим параметрам (ТГП), что отражает нелинейный характер влияния внешних возмущающих воздействий в виде температуры  $T_{вх}$  и давления на входе  $P_{вх}$ . Зависимости (1) задаются таблично.

Применяемые динамические модели ГТД являются кусочно-линейными дифференциальными моделями пространства состояний и имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \bar{x} &= A \Delta \bar{x} + B \Delta \bar{u}; \\ \Delta \bar{y} &= C \Delta \bar{x} + D \Delta \bar{u}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Delta \bar{x} = \text{col}[n_{ст i} - n_i]$  – вектор фазовых динамических координат;  $\Delta \bar{u}$  – вектор отклонений управляющих и возмущающих воздействий;  $\Delta \bar{y} = \text{col}[\Delta n_i, \Delta T_i, \Delta P_k, \Delta \pi_k, \Delta N]$  – вектор отклонений выходных координат,  $A, B, C, D$  – матрицы, коэффициенты которых являются кусочно-постоянными

функциями режимного параметра ( $G_T$  либо  $\pi_k = P_k / P_{вх}$ , обороты свободной турбины для турбовального ГТД).

Структурная организация КЛДМ ГТД, представленная на рис.1, весьма специфична и существенно отличается от общепринятых моделей пространства состояния динамических объектов.

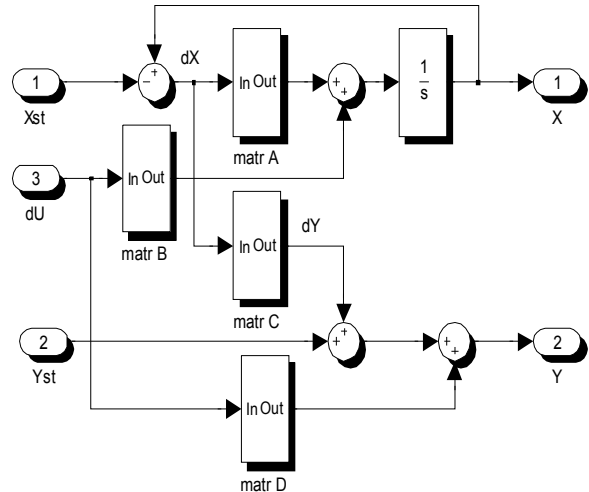


Рис. 1. Схема пространства состояния КЛДМ ГТД

Указанные КЛДМ успешно применяются в качестве средства модельной поддержки разработки САУ и реализуются в стендах-имитаторах, однако имеют ряд существенных недостатков, основными из которых являются следующие:

1) по своей организации такие ММ являются численным средством решения систем нелинейных дифференциальных уравнений и требуют значительных вычислительных ресурсов;

2) при достаточно высокой точности статической модели, уточняемой обычно на стендовых испытаниях, динамическая модель является плохо идентифицируемой, в особенности что касается матрицы  $A$ ;

3) имеют место разрывы в точках сопряжения диапазонов аппроксимации, а так как координаты состояния являются оборотами турбин, то наблюдается разрывность ускорений, что недопустимо, в частности при моделировании турбовальных ГТД.

Поэтому КЛДМ нуждаются в усовершенствовании для решения традиционных задач и существенной доработке для получения оценок косвенно измеряемых ТГП (КТГП) в САУ.

Особенностью представленных на рис.1 КЛДМ является включение матрицы  $A$  в канал формирования разностного сигнала  $\Delta \bar{x} = \text{col}[n_{ст i} - n_i]$ . На рис. 2 представлена часть КЛДМ, используемая при моделировании температурного режима двухвального ГТД.

Для получения оценок КТПП в масштабе Real Time имеет место избыточность применяемых КЛДМ ГТД, позволяющих воспроизвести все ТГП ГТД при заданных управляющих и возмущающих воздействиях, в то время как часть таких параметров являются непосредственно измеряемыми (обороты турбин  $n_i$ ) с высокой точностью (0,1%).

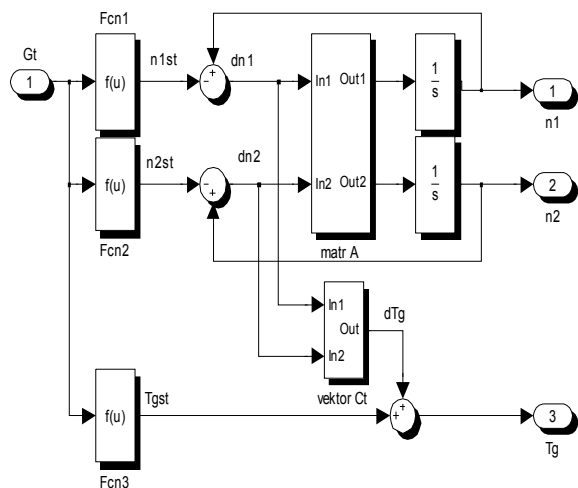


Рис.2. Схема пространства состояния КЛДМ двухвального ГТД

Целесообразно использовать такие параметры в качестве входных в ММ, что существенно упрощает ее структуру и обеспечивает безитерационное получение КТПП. В таких безитерационных математических моделях (БИММ) необходимо использовать только второе уравнение из динамической модели (2), заменяя в нем модельные значения оборотов турбин фактически измеренными

$$\Delta \bar{y} = C \Delta \bar{n}_{ism} + D \Delta \bar{u}, \quad (3)$$

где  $\Delta n_{ismk} = n_{ismk} - n_{stk}$  – приращение оборотов к-й турбины.

Схемную организацию БИММ иллюстрирует рис. 3.

Очевидными достоинствами предложенной модели является необходимость определения только статических характеристик двигателя, которые известны с высокой точностью по результатам стендовых приемочных испытаний, и элементов матрицы C, методы уточнения которых будут рассмотрены отдельно.

Второй вариант определения КТПП, тесно связан с первым и основан на использовании первого уравнения в (2) согласно соотношению

$$\Delta \bar{y} = C A^{-1} \frac{d}{dt} \bar{n}_{ism} + D \Delta \bar{u}. \quad (4)$$

Ввиду необходимости использовать производные измеряемых оборотов турбин, имеющиеся в САУ, такая модель названа ММ с динамической

коррекцией (ММДК). Схемную реализацию ММДК иллюстрирует рис.4.

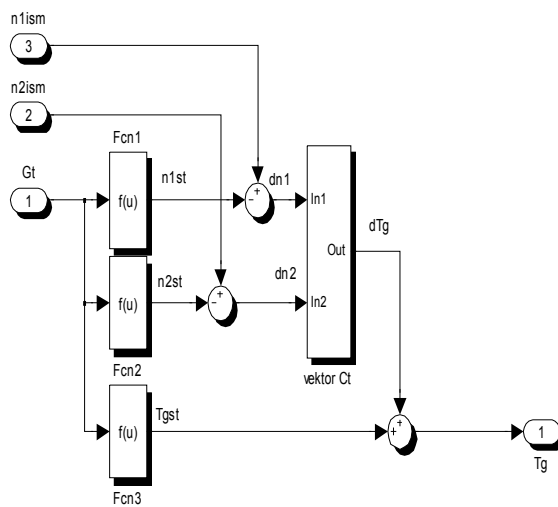


Рис. 3. Схема реализации БИММ двухвального ГТД

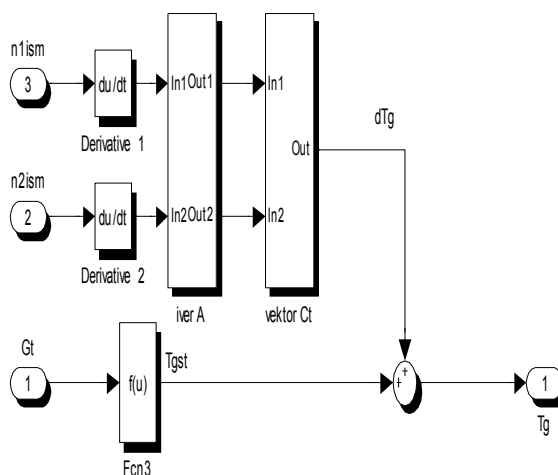


Рис. 4. Схема реализации ММДК двухвального ГТД

Выполнена компьютерная реализация предлагаемых КЛДМ для трехвального двигателя Д-436 в режиме «приемистость» в сопоставлении с реальными базами данных и проведена численная оценка точности моделей. Изменение  $\pi_k$  иллюстрирует рис. 5. Среднеквадратическая ошибка (СКО) модельных значений относительно фактически измеренных составила 0,72% для КЛДМ, 0,73% для БИММ и 2,7% для ММДК. На рис. 5 представлены результаты оценки  $T_g^*$ . СКО модельных значений относительно фактически измеренных составила 0,86% для КЛДМ, 1,06% для БИММ и 0,89% для ММДК.

На рис. 6 представлено изменение температуры двигателя как косвенного параметра, определенного по БИММ путем линейной замены переменных:

оборотов турбины вентилятора на измеренное значение  $\pi_k$ . СКО при такой замене составила 1,25%.

Идейной основой такой замены переменных является тот факт, что в пространстве состояния модели параметры отклонений оборотов турбин составляют базис, а соотношения (3) можно трактовать как формулу замены такого базиса.

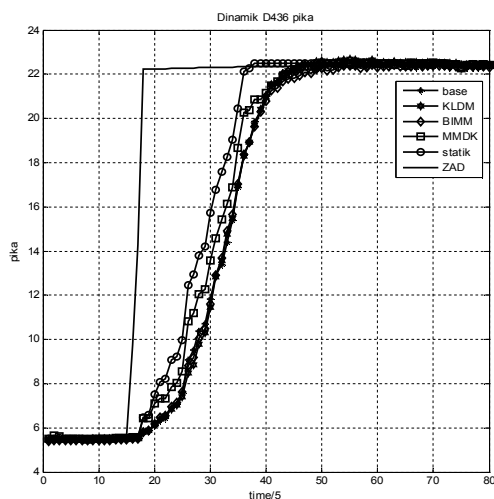


Рис. 5. Результаты моделирования Д-436 по  $\pi_k$

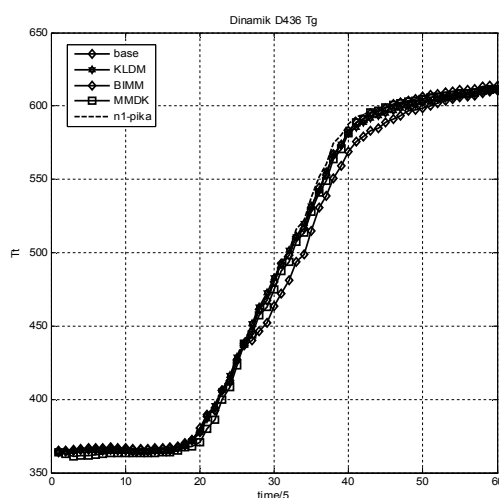


Рис. 6. Результаты моделирования Д-436 по  $T_g^*$

Получено общее соотношение указанной замены через элементы матрицы  $C$  в следующем виде:

$$\Delta \bar{y}_k = (c_{kj} / c_{mj}) \cdot \Delta y_m + \sum_{i=1}^n \left[ (-c_{kj} / c_{mj}) \cdot c_{mi} + c_{ki} \right] \cdot \Delta x_i, \quad (5)$$

где  $\Delta x_i$  – заменяемый параметр;  $\Delta y_m$  – включаемый параметр.

Развитие предложенного подхода позволяет обеспечить повышение достоверности оценок ТГП

на основе избыточности формируемого координатного базиса ММ. Следовательно, при отказе любого из ИК имеется возможность замены измеряемого параметра его вычисленным по ММ значением. Так как все бортовые ИК имеют резервирование, то, кроме того, может выполнено диагностирование состояния и замещение ИК с непараметрическим отказом путем организации мажоритарного решения «2 из 3-х».

Соотношение (3) может рассматриваться как уравнение регрессии параметров  $\Delta x_i$  на параметры  $\Delta y_m$ , а элементы матрицы  $C$  суть коэффициенты такой регрессии. Регрессионный статистический анализ БД испытаний и эксплуатации таким образом позволяет установить значения указанных коэффициентов с заданной доверительной вероятностью и их изменение как для различных режимов, так и в процессе эксплуатации и, тем самым, повысить адекватность ММ текущему состоянию ГТД и точность формирования КТГП. На рис.7 представлены результаты регрессионного анализа параметров двигателя Д-436-03 по базам данных бортовой регистрации в полете № 207 на крейсерском режиме.

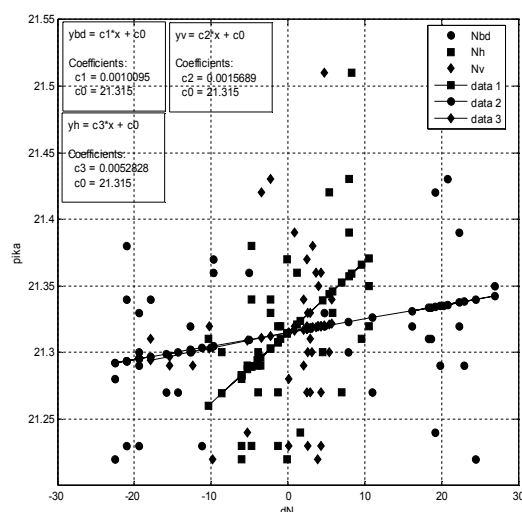


Рис. 7. Результаты оценки ММ Д-436

## Заключение

Предложенные регрессионные формы ММ процессов управления и контроля параметров ГТД являются естественным упрощением КЛДМ исключительно к предлагаемой области применения: получения оценок косвенно измеряемых параметров в бортовых и наземных средствах. Для проектирования ЭСУ и реализации в стендах-имитаторах, разумеется, необходимы полноформатные ММ. Однако и в указанных задачах, при использовании для тестирования ЭСУ реальных баз данных стендовых испытаний ГТД предлагаемые ММ могут быть полезными.

Дальнейшее усовершенствование предлагаемых регрессионных форм ММ может быть достигнуто путем применения соответствующих методов оценки матрицы  $C$  в КЛДМ непосредственно по базам данных летной эксплуатации, что определяет перспективы дальнейших исследований.

### Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
2. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей / А.А. Шевяков, Т.С. Мартынова и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Гольберг Ф.Д. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления / Ф.Д. Гольберг, А.В. Батенин. – М.: МАИ, 1999. – 80 с.
4. Лейбов Р.Л. Системы с неопределенными собственными значениями / Р.Л. Лейбов. – М.: Изд-во асс. строит. вузов, 2006. – 184 с.
5. Марковские модели сложных динамических систем: идентификация, моделирование и контроль состояния / Г.Г. Куликов, П.Дж. Флеминг, Т.В. Брейкин и др. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1998. – 104 с.
6. Миргород В.Ф. Модальная и интегральная формы математических моделей газотурбинных двигателей / В.Ф. Миргород, В.М. Грудинкин // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3. – С. 185-189.

Поступила в редакцию 24.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Г. Антошук, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.

### РЕГРЕСИВНІ ФОРМИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ПАРАМЕТРІВ РЕЄСТРАЦІЇ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**В.Ф. Миргород, Ю.В. Черкасов**

Для вирішення завдань управління режимами по непрямим параметрах і контролю стану стосовно бортової апаратури пропонуються нові регресійні форми математичних моделей газотурбінних двигунів. Основою побудови та реалізації пропонованих математичних моделей є часткова заміна модельованих параметрів ГТД на безпосередньо вимірювані із високою точністю, зокрема, оберти турбін двигуна. При такій заміні вимірювані параметри двигуна визначаються регресійними залежностями від відхилень безпосередньо вимірювальних. Проведено комп'ютерне моделювання та співставлення з даними політної експлуатації.

**Ключові слова:** математична модель, комп'ютерна реалізація, газотурбінний двигун.

### REGRESSIVE FORMS OF MATHEMATICAL MODELS FOR MANAGEMENT AND CONTROL PROCESSES OF THE GAS TURBINE ENGINE STATE

**V.F. Virgorod, Y.V. Cherkasov**

For the decision of tasks of management on indirect parameters and control of the state the modes primenitel'no to the airborne equipment the new regressive forms of mathematical models of turbo-engines are offered. Basis of construction and realization of the offered mathematical models is partial replacement of the designed parameters of GTD on directly measureable with high exactness, in particular, turns of turbines of engine. At such replacement the indirectly measureable pair-meters of engine are determined.

**Key words:** mathematical model, computer realization, turbo-engine.

**Миргород Владимир Федорович** – канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе ОАО "Элемент", Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

**Черкасов Юрий Владимирович** – начальник отдела ГП ЗМКБ "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина, e-mail: 03509@ivchenko-progress.com.

УДК 621.314.517

В.П. РОЙЗМАН<sup>1</sup>, С.А. ВОРОНОВ<sup>2</sup>, А.Т. БОГОРОШ<sup>2</sup>, А. БУБУЛИС<sup>3</sup>, В. ЮРЕНАС<sup>3</sup><sup>1</sup>Хмельницкий национальный университет, Украина<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина<sup>3</sup>Каунасский технологический университет, Литва

## НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ РАБОТЕ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

*Рассмотрена проблема надежности современной радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих электрорадиоэлементов при эксплуатации в экстремальных условиях. Проведен аналитический обзор работ по данной тематике, указаны основные виброчастотные параметры, влияющие на надежность радиоэлектронной аппаратуры а также базовые элементы чаще всего выходящие из строя. Анализ нагрузок, действующих на радиоэлектронные системы, позволяет определить требования к радиоэлектронным компонентам, которые должны иметь высокую надежность, вибро- и ударопрочность.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, вибрации, удары, транспортные средства.

### Введение

Сложные изделия электронной техники состоят из подавляющего большинства типичных узлов, микросхем, модулей, триггеров, смесителей, линий задержки и так далее, которые, в свою очередь, собранные из типичных электрорадиоэлементов: например, резисторов и конденсаторов разнообразных конструкций и видов. В развитых странах количество таких деталей достигает десятки миллиардов штук в год. Они дешевы в изготовлении, но в сложных условиях эксплуатации недостаточно надежные. Тенденция к снижению веса (так, например, радиолампы везде заменены транзисторами), получения высокой плотности монтажа и обеспечение герметичности в современных радиоэлектронных системах привела к уменьшению жесткости элементов. Эксплуатация таких изделий из новых неметаллических материалов с недостаточно изученными механическими свойствами в условиях эксплуатации разнообразных объектов военной и гражданской техники: ракет, самолетов, бронемашин, автомобилей, поездов, судов, радиолокационных станций, компьютеров и других при больших перепадах температур и давления в условиях вибраций и ударов часто приводит к отказам в результате разрушения отдельных частей и разгерметизации. В радиоэлектронике из-за действия внешних нагрузок и несовершенных технологий изготовления в изделиях возникают внутренние напряжения, от действия которых возникают отклонения параметров за границы технических условий, что в большинстве случаев приводит к их отказам еще задолго до разру-

шения. Цена таких отказов бывает чрезвычайно высокой. Да, разрушение резистора стоимостью три доллара привели в США к гибели ракеты стоимостью 140 млн. долларов. Поломка вывода одной из недорогих микросхем привела в СССР к потере связи с опущенным на Венеру и работающим там космическим аппаратом. Известно аналогичные примеры, когда через отказ электронной техники в результате разрушения недорогого элемента возникали катастрофы или аварии самолетов, судов, атомных электростанций и других объектов, основной составной частью которых были современные электронные системы. При этом потери насчитывало много миллионов долларов, не говоря уже о человеческих жертвах.

Проблема надежности продолжает оставаться одной из наиболее острых проблем современной радиоэлектроники. Основными факторами, которые влияют на надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) остаются:

- скрытые дефекты комплектующих изделий;
- нарушение технологии сбора и доли РЭА;
- недостатки схемы и конструкций аппаратуры.

Анализ нагрузок, действующих на радиоэлектронные системы (РЭС), позволяет определить требования к радиоэлектронным компонентам, которые должны иметь высокую надежность, вибро- и ударопрочность, малую массу и габариты, низкую стоимость, быть технологическими и взаимозаменяемыми. Именно эти свойства в основном определяют качество аппаратуры, ее назначения и эксплуатационные характеристики.

Механические нагрузки осуществляют существенное влияние на надежность изделий радиоэлектроники и вызывают от 30 до 50 процентов всех ее отказов, а в авиации – до 80 процентов, ухудшают точность и другие параметры аппаратуры. При этом надежность всего изделия в целом, его безотказность в работе в большинстве определяется надежностью составляющих его элементов. Следует отметить, что количество элементов в радиоэлектронной аппаратуре каждые 5 лет увеличивается в 2 – 5 раз.

При эксплуатации радиокомпоненты и функциональные узлы могут работать при температуре от  $-65$  к  $+250$  градусов Цельсия, с вибрационными частотами от 5 до 5000 Гц, при ускорении до 40 g, подаваться ударам с ускорением до 120 g, относительная влажность может изменяться от 5 до 100%, атмосферное давление – в пределах  $6,6 \times 10^{-4}$  –  $1 \times 10^6$  Па, фоновое излучение (проникающая радиация и гамма-излучение) могут достигать  $10^{10}$  рад/с. В нескольких случаях эти влияния могут быть еще жестче [1].

Если учесть, что в сложных РЭС насчитываются десятки, сотни и тысячи однотипных элементов радиоэлектроники, то можно представить, какое значение имеет безотказность каждого из них для безотказности системы в целом.

В результате исследований установлено следующее распределение причин отказов радиоэлектронной аппаратуры:

- дефекты электрорадиоприборов – 44%;
- схемно-конструкторские недостатки аппаратуры – 15,4%;
- недостатки производства аппаратуры – 36,6%;
- нарушение в эксплуатации – 3,5%;
- причина не установлена – 0,5%.

Приведено выше распределение причин отказов относится ко всей совокупности исследованных электрорадиоприборов.

### Анализ элементной базы и ее влияние на надежность изделий в сложных условиях эксплуатации

Изучения условий труда радиоэлектронных изделий обнаружили, что они работают, как правило, под действием сложной совокупности дестабилизирующих факторов. К основным факторам, которые влияют больше всего, относятся факторы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Дестабилизированные факторы, которые больше всего влияют на работу РЭА

| Объективные факторы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Субъективные факторы                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Окружающая среда:</b></p> <p>температура;<br/>влажность;<br/>солнечная радиация;<br/>атмосферное давление;<br/>порох и песок;<br/>биологическая среда.</p> <p><b>Условия работы:</b></p> <p>режим использования;<br/>старение;<br/>механические нагрузки;<br/>вибрации и ударные нагрузки, термоудары, акустическое действие, путевая тряска, неуравновешенность быстрооборотных деталей, ударная волна, резкие порывы ветра, быстрые турбулентные потоки;<br/>проникающая радиация.</p> | <p><b>Организация технической эксплуатации:</b></p> <p>техническое обслуживание;<br/>ремонт;<br/>хранение;<br/>контроль технического состояния;<br/>материально-техническое обеспечение.</p> <p><b>Деятельность обслуживающего персонала:</b></p> <p>квалификация;<br/>соблюдение правил безопасности.</p> |

Наиболее опасными из указанных факторов являются вибрационные и ударные нагрузки, термоудары, акустическое действие, путевая тряска, неуравновешенность быстрооборотных деталей, ударная волна, резкие порывы ветра, быстрые турбулентные потоки и другие.

Возможные диапазоны вибрации РЭА, установленных на разнообразные подвижные объекты, и максимальные амплитуды колебаний по нашим исследованиям и [1, 2] представлено в табл. 2.

Исследования показали, что действующие нагрузки приводят к разрушению отдельных деталей и узлов радиотехники, или к изменению параметров радиотехнических электрорадиоэлементов и узлов, что ведет к снижению точности работы аппаратуры и помехам в каналах передачи информации или к отказам изделий.

Например, у радиолокационных и сканирующих антенн возможное отклонение зеркала через вибрации элементов повода и люфтов в соеди-

нениях, в результате чего могут возникнуть периодические отклонения антенн от их нормального положения, колебания зеркала и облучателя, который

может привести к полному нарушению работы станции или отклонения от цели ракеты.

Таблица 2

Возможные диапазоны частот вибрации РЭА, установленных на разных подвижных объектах и максимальные амплитуды колебаний

| Вид РЭА                                                        | Частота вибрации, Гц | Максимальная амплитуда, мм |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| <b>Наземные, что устанавливаются в транспортных средствах:</b> |                      |                            |
| в кузовах автомашин                                            | 0– 80                | 1– 2,5                     |
| на тракторах, бронетранспортерах колесного типа                | 8– 15                | 1                          |
| на тракторах гусеничного типа                                  | 400– 700             | 0,25                       |
| на танках                                                      | 20– 2000             | 0,25                       |
| <b>Самолетные:</b>                                             |                      |                            |
| на самолетах с поршневым двигателем                            | 5– 150               | 0,15– 5                    |
| на самолетах с реактивным двигателем                           | 5– 500               | 0,025– 0,3                 |
| <b>Ракетные</b>                                                |                      |                            |
| на грани разгона ракеты                                        | 5– 500               | –                          |
| в полете ракеты                                                | 30– 5000             | 1– 3                       |
| <b>Судовые</b>                                                 |                      |                            |
| на подлодках большого тоннажа                                  | 2– 35                | 1                          |
| на подлодках малого тоннажа                                    | 5– 150               | 1                          |
| <b>Примененные в железнодорожном транспорте</b>                | 2– 10                | до 35                      |

В сложные радиолокационные устройства входят десятки, сотни и даже тысячи элементов радиоэлектроники. В Украине проблемами обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры занимается, в частности Институт Критических технологий и надежности радиоэлектроники. При анализе причин отказов электрорадиоприборов, что входят в состав ра-

диоаппаратуры, объектами исследований были полупроводниковые диоды, транзисторы, полупроводниковые и гибридные микросхемы, пленочные резисторы, электролитические конденсаторы, электромагнитные реле, и коммутационные изделия. Распределение отказов аппаратуры, связанных с заменами электрорадиоприборов, показано в табл. 3 [1– 3].

Таблица 3

Распределение отказов РЭА, связанных с заменами ЕРЕ (%)

| №<br>п/п | Причина отказа                         | Интегральные микросхемы |          |          |      | Транзисторы | Диоды | Резисторы | Конденсаторы | Реле |
|----------|----------------------------------------|-------------------------|----------|----------|------|-------------|-------|-----------|--------------|------|
|          |                                        | общие<br>данные         | линейные | цифровые |      |             |       |           |              |      |
|          |                                        |                         |          | ТТЛ      | КМОП |             |       |           |              |      |
| 1        | Дефект ЭРИ                             | 36                      | 33,5     | 43       | 34,6 | 36,7        | 57,8  | 53,9      | 61,3         | 61,4 |
| 2        | Схемноконструкторские<br>недостатки    | 30,1                    | 39,2     | 24,4     | 26,8 | 37,1        | 15,8  | 30,2      | 2            | 10,7 |
| 3        | Недостатки техноло-<br>гии производств | 31,6                    | 27,3     | 32,6     | 38,6 | 25,7        | 26,4  | 11,6      | 36,7         | 17,9 |
| 4        | Нарушение условий<br>эксплуатации      | 1,4                     |          |          |      | 0,4         |       | 4,3       |              |      |
| 5        | Неустановленные при-<br>чины           | 0,9                     |          |          |      |             |       |           |              |      |

Исследования показали, что через дефект конденсаторов имеет место 61,3% отказов РЭА.

Конденсаторы составляют основу практически дорогой радиоэлектронной схемы, пристрою или прибору, т.е. процент конденсаторов от общего количества элементов в радиоэлектронных средствах составляет от 28% до 45%. [1, 2].

Такие предприятия, как "Позитрон" и "Катион" также столкнулись с проблемой отказов "баночных", электролитных и пленочных конденсаторов К78-3, К50-16 и К50-32. Причиной этих отказов была разгерметизация узлов защиты от влаги, которая происходила при изменениях температуры окружающей среды. Имея разные (иногда недостаточно

изученные) физико-механические характеристики материалов, из которых изготовленные элементы стандартной конструкции узла влагозащиты они неодинаково реагируют на смену состояния окружающей среды. Поэтому при изменении температур детали конструкции действуют несогласованно, что вызывает отслаивание компаунда от стенок корпуса и растрескивание компаунда [3].

### Заключение

Приведенные материалы показывают на необходимость проведения исследований, как бы позволили усовершенствовать конструкции и технологические процессы производства конденсаторов и повысить надежность радиоэлектронных приборов, в том числе путем математического моделирования и прогнозирования дефектообразования [4, 5].

Работа выполнена в рамках проектов: No AUT-09/2010 и No TRA-30/2010, финансируемых Советом Науки Литвы.

### Литература

1. Трифонюк В.В. Надежность устройств промышленной электроники / В.В. Трифонюк. – К.: Лыбидь, 1992. – 62 с.
2. Ленков С.В. Обеспечение надежности РЭА / С.В. Ленков. – К.: ТЛПУ, 1997. – 48 с.
3. Ройзман В.П. Некоторые проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры / В.П. Ройзман, А.К. Бережнюк // Вестник Технологического университета Подолья. – Хмельницкий, 2004. – № 1, ч. 1. – С. 181-186.
4. Богорош О.Т. Моделирование магнитного контроля гетероструктур / О.Т. Богорош, П.О. Стебляко // Математические проблемы технической механики – 2006: материалы международной научной конференции. – Днепропетровск, Днепродзержинск, 17-20 апреля 2006. – С. 81-82.
5. Ройзман В.П. Smart Ski Technology - электронная демпфирующая система / В.П. Ройзман, А.Т. Богорош, С.А. Воронов // Вестник Хмельницкого национального университета. – Хмельницкий, 2008. – № 3. – С. 17-21.

Поступила в редакцию 14.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Р. Ионушас, Каунасский технологический университет, Каунас, Литва.

### НАДІЙНІСТЬ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПРИ РОБОТІ НА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

**В.П. Ройзман, О.Т. Богорош, С.О. Воронов, А. Бубулис, В. Юренас**

Розглянуто проблему надійності сучасної радіоелектронної апаратури і комплектуючих електрорадіоелементів при експлуатації в екстремальних умовах. Проведено аналітичний огляд робіт з даної тематики, вказані основні віброчастотні параметри, що впливають на надійність радіоелектронної апаратури а також базові елементи що найчастіше виходять з ладу.

**Ключові слова:** радіоелектронна апаратура, вібрації, удари, транспортні засоби.

### RELIABILITY OF THE RADIO-ELECTRONICS EQUIPMENT OPERATING IN LOCOMOTION MEANS

**V.P. Roizman, S.O. Voronov, O.T. Bogorosh, A. Bubulis, V. Jurenas**

Presented paper considers the reliability problem of the modern radio-electronics equipment, electronics and radio components, operating under extreme conditions. The analytical analysis of the works within this subject-matter is carried out and main vibrations-frequency related parameters, having influence on the reliability of the radio-electronics equipment and basic elements that commonly are undergoing failures, are identified.

**Key words:** radio-electronics equipment, vibrations, impacts, locomotion means.

**Ройзман Вилен Петрович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри прикладної механіки Хмельницького національного університета, Хмельницький, Україна, e-mail:royzman@mailhub.tup.km.ua.

**Воронов Сергей Александрович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри прикладної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, e-mail:voronov@ntu-kpi.kiev.ua.

**Богорош Александр Терентьевич** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри прикладної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, e-mail:fondfti@ntu-kpi.kiev.ua.

**Бубулис Альгимантас** – д-р техн. наук, головний научний співробітник Центра мехатроніки Каунаського технологічного університета, Каунас, Литва, e-mail:algimantas.bubulis@ktu.lt.

**Юренас Витаутас** – канд. техн. наук, старший научний співробітник кафедри мехатроніки Каунаського технологічного університета, Каунас, Литва, e-mail:vytautas.jurenas@ktu.lt.

УДК 004

В.П. КВАСНИКОВ, Л.О. БАБІЧ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## РОЗПОДІЛЕННЯ ЗАДАЧ В НЕОДНОРІДНІЙ ГРУПІ РОБОТІВ В ПРОЦЕСІ КОЛЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

*Розглянуто задачу розподілення завдань з перериваннями в неоднорідній групі роботів (роботи можуть відрізнятись функціональними можливостями) в процесі колективного управління. Виконана формалізація процесу розподілення задач серед роботів групи елементами теорії множин. Запропонована математична абстракція робочого середовища групи роботів у вигляді підмножини декартового добутку множини роботів та множини ресурсів. Запропоновані алгоритми розподілу задач між роботами групи з перериваннями, в яких завдання, що виконується роботом може бути призупинене для виконання цим роботом іншого завдання, причому виконання першого завдання може бути передане для виконання іншому роботу.*

**Ключові слова:** група роботів, колективне управління, розподілення задач, система завдань, робот.

### Вступ

Роботи застосовуються у багатьох галузях науки, техніки та промисловості, в першу чергу там, де застосування людської праці неможливе чи пов'язано з ризиками для життя або здоров'я, наприклад, в зонах радіоактивного чи хімічного забруднення, в умовах бойових дій, під час проведення підводних або космічних досліджень. Однак, зрозуміло, що одиночний робот, яким би інтелектуальним він не був, може застосовуватися лише для рішення деяких поодиноких задач або виконання досить простих операцій, оскільки він, як правило, має порівняно невеликі ресурси для виконання поставленої задачі:

- малий радіус дії, обмежений бортовим енергоресурсом;
- невелика кількість функціональних можливостей;
- обмежений набір виконавчих пристроїв;
- вкрай низька ймовірність виконання поставленої задачі в екстремальних ситуаціях, оскільки відсутнє будь-яке резервування, тобто вихід з ладу поодиноким роботом беззаперечно унеможливить виконання поставленого завдання.

Очевидним вирішенням вказаних вище проблем є застосування одразу декількох роботів, тобто груп роботів. Це дає можливість вирішення таких складних завдань, як наприклад, масштабне дослідження поверхонь інших планет, будівництво складних конструкцій в космосі та в зонах радіоактивного ураження, участь в бойових та розвідувальних операціях, рятувальних операціях та гасінні пожеж. При цьому виникають нові проблеми групового

управління, комунікації та алокації завдань, зв'язаних з організацією групової взаємодії роботів.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Рішенням проблеми колективного управління групою роботів займалися такі відомі вчені як: С.Г. Капустян, А.В. Тимофієв, К. Лерман, М. Дж. Матарик, Дж. Мак Луркін, Д. Ямінс, С. Ботелло та ін. [1 – 3] Аналізуючи результати досліджень можна зробити висновок що на сьогодні не існує будь якого узагальненого підходу до розподілення задач в процесі колективного управління групою роботів. Крім того, більшість дослідницьких проектів приймає виконання завдань в ідеальних умовах за відсутності зовнішніх сил що збурюють систему. Тому вирішення поставленої задачі є досить актуальним кроком вирішення цілісної проблеми колективного управління групи роботів.

### Викладення основного матеріалу

Формально представимо групу роботів наступним чином:

$$GR = (P, R),$$

де  $P = \{P_1, \dots, P_m\}$  – множина роботів;  $R = (TR, M)$  – пара, що вміщує в собі типаж  $TR = \{TR_1, \dots, TR_k\}$  та кількісний склад  $M = \{m_1, \dots, m_k\}$  допоміжних ресурсів.

Тобто вважається, що в системі є  $m_i$  ідентичних ресурсів типу  $TR_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ . Роботи  $P_1, \dots, P_m$  можуть бути ідентичними або функціонально різними.

Завдання – це елементарна одиниця процесу з не специфікованими внутрішніми операціями та

відношеннями, але зі специфікованими зовнішніми функціями (відношення до інших завдань, необхідні пристрої, час виконання, вхідні та вихідні дані, ресурси і т.д.).

Процес – це множина завдань, в котрій присутній частковий порядок, що представляє собою внутрішню послідовність окремих завдань в ході їх виконання.

Система завдань:

$$TS = (T, <),$$

де  $T = \{T_1, \dots, T_n\}$  – множина завдань;  $<$  – частковий порядок на  $T$ .

Відношення представляється наступним чином: якщо  $T_i < T_j$ , то завдання  $T_i$  необхідно виконати перед початком виконання завдання  $T_j$ .

На частковий порядок  $<$  накладається умова ациклічності, відсутність надлишкових зв'язків (транзитивність) та (без втрати загальності) наявність одного входу (без попередників) та одного виходу (без послідовників).

Якщо систему завдань  $TS$  реалізувати на  $GR = (P, R)$ , то з завданнями  $T_1, \dots, T_n$  пов'язуються наступні величини:

$t_{ij}$  – час, необхідний для виконання завдання  $T_i$  роботом  $P_j$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ ;

$r_{ij}$  – число ресурсів  $TR_j$  необхідних для виконання завдання  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, k$ .

Вважаємо, що  $r_{ij} \leq m_j$  для  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, k$ . Величини  $t_{ij}$  і вважаються відомими.

Нехай для виконання завдань  $TS \in GR$  і визначені  $t_{ij}$  і  $r_{il}$  для  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $l = 1, \dots, k$ . Порядок призначення роботів та ресурсів із  $GR$  для вирішення завдання з системи  $TS$  назовемо розподілом  $TS$  на  $GR$ . Довжиною розподілу вважатимемо час, що проходить від початку виконання  $TS$  на  $GR$  згідно даного розподілу до повного виконання системи  $TS$ . Цю довжину позначимо як  $t(S(TS, GR))$ .

З системою завдань  $TS$  при її вирішенні на даній множині роботів  $\{P_1, \dots, P_m\}$  пов'язана матриця  $(S_{ij})$ ,  $1 \leq i \leq m$ ,  $1 \leq j \leq n$ , в якій  $S_{ij}$  – швидкість вирішення завдання  $T_j$  роботом  $P_i$ . Вважаємо, що  $S_{ij} \geq 0$  для кожного  $i, j$ , при чому рівність  $S_{ij} = 0$  означає, що задача  $T_j$  не може бути вирішена роботом  $P_i$ .

При вирішенні завдання  $T_j$  роботом  $P_i$  прий-

матиметься до уваги скорочення тривалості  $t_j$  завдяки швидкодії  $S_{ij}$ . Завдання вважатимемо вирішеним, якщо його тривалість буде нульовою.

Розподіли можна поділити на два класи:

– розподіли без переривання, в яких завдання лишається за призначеним роботом до повного вирішення;

– розподіли з перериваннями, в яких завдання, що виконується роботом може бути призупинене для виконання цим роботом іншого завдання, причому виконання першого може бути передане для виконання іншому роботу.

Алгоритм 1.

Вхід:  $\tau = t_1 = t_2 = \dots = t_n$ ,  $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_n$ ,  $m$ ,  $n$ .

Вихід: оптимальний розподіл  $S(TS, GR)$  з перериваннями.

1. Якщо  $m > n$ , то  $m := n$ .

2. Присвоїмо  $t := \frac{n\tau}{\sum_{i=1}^m S_i}$ ,  $t$  – тривалість оптимального розподілу.

3. Якщо  $\frac{\tau}{S_m} > t$ , переходимо до 8.

4. Назначимо завдання  $T_1$  роботу  $P_1$  на інтервалі часу  $\left\langle 0, \frac{\tau}{S_1} \right\rangle$ .

5. Виконуємо крок 6 для  $T_2, T_3, \dots, T_n$ .

6. Нехай завдання  $T_1, \dots, T_{j-1}$  вже назначені роботам  $P_1, \dots, P_{i-1}$  в інтервалі  $\langle 0, t \rangle$  і роботу  $P_i$  в інтервалі  $\langle 0, c \rangle$  для деякого  $c < t$ . Розглядаємо завдання  $T_j$ .

Якщо  $c + \frac{\tau}{S_i} \leq t$ , то призначаємо завдання  $T_j$

роботу  $P_i$  в інтервалі  $\left\langle c, c + \frac{\tau}{S_i} \right\rangle$ , інакше призначаємо  $T_j$  для  $P_i$  в інтервалі  $\langle c, t \rangle$  і для  $P_{i+1}$  в інтервалі  $\left\langle 0, \frac{\tau - S_i(t - c)}{S_{i+1}} \right\rangle$ .

7. Переходимо до 9.

8. Розділяємо інтервал  $\langle 0, t \rangle$  на  $n$  однакових інтервалів  $I_1, \dots, I_n$ . Для  $i = 1, 2, \dots, m$  і  $j = 1, 2, \dots, n$  призначаємо завдання  $T_j$  роботу  $P_i$  в інтервалі  $I_\alpha$ , де  $\alpha = (i + j - 2) \bmod (n) + 1$ .

9. Кінець.

Нехай  $t_1 = \dots = t_5 = 6$ ,  $S_i = 2, 1, 1$  для розподілу в першому випадку, тобто згідно крокам 4 і 6 алгоритму  $S_i = 3, 2, 1$  для розподілу в другому випадку згідно кроку 8.

Алгоритм 2.

Вхід:  $t_1 \geq t_2 \geq \dots \geq t_n$ ,  $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_n$ ,  $m$ ,  $n$ .

Вихід: оптимальний розподіл  $S(TS, GR)$  з перериваннями.

1. Призначимо найшвидших роботів для вирішення найдовших завдань;

якщо для деяких  $\alpha$  завдань  $T_{j+1}, \dots, T_{j+\alpha}$ ,  $j + \alpha < m$ ,  $j \geq 0$  справедливо  $t_{j+1} = \dots = t_{j+\alpha}$ , то в простому розподілі призначаються всі  $\alpha$  роботів  $P_{j+1}, \dots, P_{j+\alpha}$  всім  $\alpha$  завданням  $T_{j+1}, \dots, T_{j+\alpha}$ , причому кожне з них виконуватиметься при такому призначенні зі швидкістю

$$S = \sum_{i=j+1}^{j+\alpha} \frac{S_i}{\alpha};$$

якщо для деяких  $\alpha$ ,  $T_{j+1}, \dots, T_{j+\alpha}$  для останніх  $\beta$  роботів  $P_{m-\beta+1}, \dots, P_m$  справедливо  $t_{j+1} = \dots = t_{j+\alpha}$ , то призначаються всі  $\beta$  роботів

$P_{m-\beta+1}, \dots, P_m$  всім завданням  $T_{j+1}, \dots, T_{j+\alpha}$ , причому кожне з них буде вирішено зі швидкістю

$$S = \sum_{i=m-\beta+1}^m \frac{S_i}{\alpha}.$$

2. В кожний момент часу після кроку просування у відповідності з миттєвим призначенням повинні виконуватись найкоротші завдання або їх частини, а роботи, що звільнилися повинні призначатись більш тривалим завданням або їх частинам у відповідності з кроком 1 (кількість завдань залишається незмінною, змінюється лише їх тривалість).

3. Якщо тривалість всіх завдань зменшено до нуля ( $TS$  вирішено), то розподіл  $S(TS, GR)$  буде наступним чином:

якщо в простому розподілі робот  $P_j$  був призначений в часовому інтервалі  $\langle \tau_1, \tau_2 \rangle$  лише задачі  $T_j$ , то і для  $S(TS, GR)$  задачу  $T_j$  призначаємо для робота  $P_j$  в інтервалі  $\langle \tau_1, \tau_2 \rangle$ ;

якщо в простому розподілі було  $\alpha$  роботів  $P_{j+1}, \dots, P_{j+\alpha}$  в часовому інтервалі  $\langle \tau_1, \tau_2 \rangle$  призначені задачам  $T_{j+1}, \dots, T_{j+\alpha}$ , то для  $S(TS, GR)$  призначаємо задачі ротам в тому ж інтервалі згідно з алгоритмом 1.

|       | 1/3   | 2/3   | 5/6   | 11/6  |       |       |       |       |       | 21/6  |       |       |  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| $P_1$ | $T_1$ | $T_1$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ |       |  |
| $P_2$ | $T_2$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_5$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ |  |
| $P_3$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_4$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_4$ | $T_5$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ |  |

Рис. 1. Розподіл  $S(TS, GR)$

В кроці 2 алгоритму 2 необхідно задати ще спосіб визначення моменту часу, коли в простому розкладі і отже в  $S(TS, GR)$  необхідно зробити переривання. Нехай для системи завдань з тривалостями  $t_1, \dots, t_n$  (ці тривалості можуть вже бути скороченими відносно вхідних) в простому розподілі в простому розподілі присутній фактичний припис  $F$ . Цей припис визначає певні підмножини роботів на підмножини завдань і складається з наступних частин:

$$F = \{F_1, \dots, F_z\}.$$

Нехай кожне  $F_j$  призначає множину потужності  $\beta_j$  з першим роботом  $P_{j_1}$  на множині завдань з тривалостями  $f_i$ . Нехай ця множина завдань має потужність  $\alpha_i$  і нехай  $f$  – тривалість першого завдання в  $TS$ , котре не призначено жодному роботу.

Якщо такою задачі немає, то покладемо  $f = 0$ . Час  $\Delta\tau$ , коли діє даний припис визначається за формулою:

$$\Delta\tau = \min \left\{ \min \left\{ x : x = \frac{\alpha_i \alpha_{i+1} (f_i - f_{i+1})}{Q_i \alpha_{i+1} - Q_{i+1} \alpha_i} \& x > 0, \right. \right. \\ \left. \left. 1 \leq i \leq k-1 \right\}, \frac{\alpha_k (f_k - f)}{Q_k} \right\},$$

$$\text{де } Q_i = \sum_{j=j_i}^{j_i+\beta_i-1} S_j \text{ для } i=1, \dots, k.$$

Таким чином  $\Delta\tau$  показує, за який час урівнюються довжини деяких завдань, які вирішуються роботами з різною швидкістю.

Доведення оптимальності даного алгоритму тривіально. Достатньо відзначити, що тривалість оптимального розподілу  $t_{opt}$  для даної системи завдань та тривалістю  $GR$  дорівнює

$$t_{\text{opt}} = \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \frac{t_1}{S_1}, \frac{t_1 + t_2}{S_1 + S_2}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^{m-1} t_i}{\sum_{i=1}^{m-1} S_i} \right\}$$

і що запропонований алгоритм дійсно дає розподіл цієї тривалості.

Нехай  $t_i = 6, 5, 4, 4, 2$  для  $i = 1, \dots, 5$ ;  $< = \emptyset$ ,  $S_i = 3, 2, 1, 1 \leq i \leq 3$ . Розподіл  $S(TS, GR)$  представлено на рис. 1.

### Висновки

Результатом дослідження проблеми розподілення задач з перериваннями в неоднорідній групі роботів (роботи можуть відрізнятися функціональними можливостями) в процесі колективного управління та формалізації процесу розподілення задач серед роботів групи елементами теорії множин є алгоритм розподілення задач між роботами групи з перериваннями, в яких завдання, що виконується

роботом може бути призупинене для виконання цим роботом іншого завдання. Запропонований алгоритм управління колективною взаємодією роботів можна застосувати при їх груповій взаємодії в процесі рішення складних завдань в екстремальних умовах.

### Література

1. Капустян С.Г. Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов / С.Г. Капустян // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2006. – № 2. – С. 84-91.
2. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы / А.В. Тимофеев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1988. – 332 с.
3. Botelho S. M+ : a scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement / S. Botelho, R. Alami. // In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'99), May 10-15 [1999]. – Detroit, Michigan, 1999. – P. 1234–1239.

Надійшла до редакції 10.05.2010

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф., проф. кафедри електротехніки та автоматики В.В. Древецький, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАЧ В НЕОДНОРОДНОЙ ГРУППЕ РОБОТОВ В ПРОЦЕССЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*В.П. Квасников, Л.О. Бабич*

Рассмотрена задача распределения задач с прерываниями в неоднородной группе роботов (роботы могут отличаться функциональными возможностями) в процессе коллективного управления. Выполнена формализация процесса распределения задач среди роботов группы элементами теории множеств. Предложена математическая абстракция рабочей среды группы роботов в виде подмножества декартового произведения множества роботов и множества ресурсов. Предложены алгоритмы распределения задач между роботами группы с прерываниями, в которых задание, которое выполняется роботом, может быть приостановлено для выполнения этим роботом другого задания, причем выполнение первого задания может быть передано для выполнения другому роботу.

**Ключевые слова:** группа роботов, коллективное управление, распределение задач, система заданий, робот.

### DISTRIBUTING OF TASKS IN THE HETEROGENEOUS GROUP OF ROBOTS IN THE PROCESS OF COLLECTIVE CONTROL

*V.P. Kvasnikov, L.O. Babich*

The problem of tasks distribution with breaking in the heterogeneous group of robots (robots can have different functional possibilities) in the process of collective management is considered. Formalization of process of tasks distribution among the group of robots by the elements of sets theory is executed. Mathematical abstraction of working environment of group of robots is offered as a subset of Cartesian product of set of robots and set of resources. Offered algorithms of distributing the tasks with breaking between robots groups, in which executed a task by a robot can be halted for implementation of other task by this robot, thus the first task processing can be passed for implementation to other robot.

**Key words:** group of robots, collective management, tasks distribution, tasks system, robot.

**Квасников Владимир Павлович** – д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой информационных технологий Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: kvp@nau.edu.ua.

**Бабич Леонид Олегович** – аспирант кафедры информационных технологий Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: LBabich@espiga.com.ua.

УДК 681

О.П. СТАШИНСЬКИЙ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИМ ПРИСТРОЄМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВІДІВ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

*Запропонована ідея впровадження системи інтелектуального управління робототехнічним діагностичним комплексом для проведення внутрішньо-трубної діагностики об'язки компресорних станцій. Приведено аналіз і коротку характеристику складності виконання таких діагностичних робіт із послідовним їх вирішенням за допомогою запропонованої методики. Проведено опис системи інтелектуального управління з наступною характеристикою її елементів в залежності від процесу виконання поставлених завдань. Приведені методи їх вирішення в рамках штучного інтелекту. Розглянуті особливості пересування робототехнічного пристрою в робочому середовищі з проведенням оцінки, та вирішенням поставлених завдань, а також плануванням передбачених обставин. Запропонована дворівнева модель такого процесу та типова схема управління рухом пристрою. Представлені комплексні методи проведення діагностики за допомогою даної системи.*

**Ключові слова:** діагностика, робототехнічний пристрій, зовнішнє середовище, штучний інтелект, база знань, задача, модель.

### Вступ

Для забезпечення надійної та безпечної експлуатації компресорних станцій (КС), враховуючи той факт, що переважна частина трубопроводної об'язки експлуатується понад встановлений термін, необхідне більш глибоке періодичне проведення оцінки технічного стану трубопроводів КС, а також контроль стану їх внутрішньої порожнини. На більшій частині трубопроводів об'язки КС (особливо підземні ділянки) технічна діагностика їх внутрішньої порожнини не проводилась з початку експлуатації.

Нова методика проведення діагностики повинна дозволити виявити дефекти різноманітного походження, визначити їх характер і розмір, відповідно класифікувати їх за ступенем небезпеки та встановити черговість проведення ремонтів. При цьому значно скоротити загальні об'єми ремонтних робіт.

Проведення діагностики внутрішньої порожнини трубопроводної об'язки компресорних станцій повинно виконуватись виключно автоматизованими пристроями даного призначення, оскільки виконання таких робіт безпосередньо людиною на діючих КС технологічно неможливе.

**Аналіз проведених досліджень.** Проаналізувавши масштаб і складність проведення таких робіт із використанням автоматизованого, телекерованого робототехнічного пристрою, необхідно врахувати ряд факторів які несуть безпосередній вплив на процес його роботи [1 – 4]: 1) висока достовірність ре-

зультатів виявлення дефектних ділянок; 2) можливість пересування по вертикальних ділянках трубопроводів, проходження вертикальних трійників та перешкод таких як “термокармани”, “дріпи”; 3) забезпечення високої надійності та маневреності руху, що виключало б необхідність проведення додаткових технологічних робіт (додаткові врізки, розкриття порожнини трубопроводу і т. п.); 4) відсутність обмеження в дальності проходження; 5) досконала система управління, та передбачення надійного зв'язку з оператором [3].

**Постановка задачі.** Для вирішення цього питання необхідно розробити робототехнічний пристрій для проведення внутрішньо-трубної діагностики, із системою інтелектуального управління [2], який б враховував значення вищезазначених факторів. Така система повинна передбачати вирішення наступних задач:

- 1) обробка сенсорної інформації;
- 2) формування моделей зовнішнього середовища;
- 3) прийняття рішень і планування подальших дій;
- 4) керування рухом;
- 5) створення інтелектуального інтерфейсу між оператором і власне роботом.

### Система інтелектуального управління

На рис. 1 показана загальна структурна схема системи інтелектуального управління таким при-

строєм. В центрі схеми знаходиться блок пам'яті з двохстороннім зв'язком з іншими системами обробки інформації. Об'єм і рівень організації пам'яті – головний показник інтелектуального потенціалу ро-

бота. В блок пам'яті входить база знань – основа інтелекту, та база даних – як про зовнішнє середовище так і про внутрішній стан системи а також операції, які вони можуть виконувати.

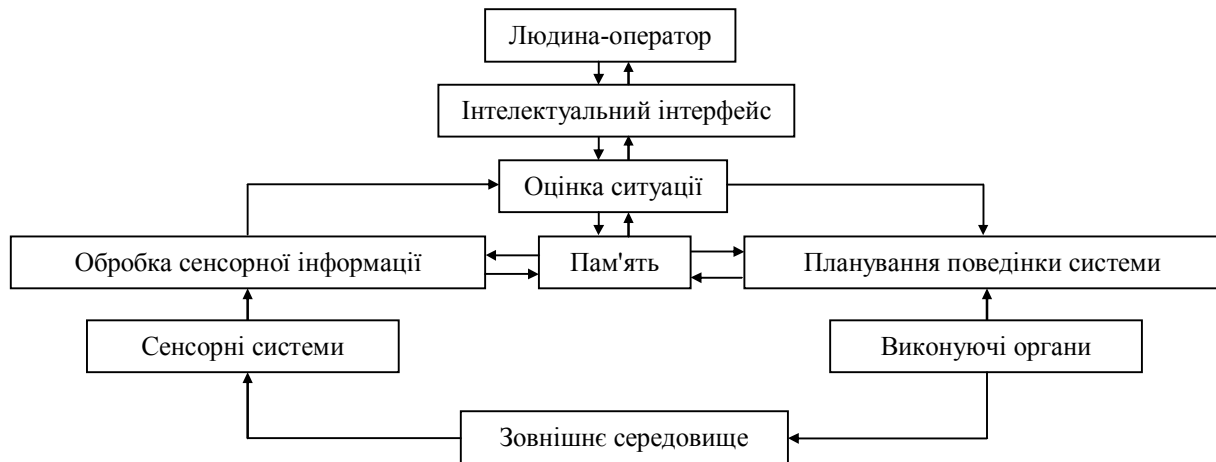


Рис. 1. Схема системи інтелектуального управління робототехнічним пристроєм

База знань зовнішнього середовища містить як апіорну інформацію, що заноситься до початку роботи (координати та геометричні розміри досліджуваних ділянок, місце виникнення передбачених перешкод, модель руху та режими роботи допоміжних систем і т. п.) так і оперативну, сенсорну інформацію, яка надходить в процесі роботи при виконанні поставлених задач (виявлення непередбачених перешкод та шлях їх обходу), а також в процесі його спеціальних пізнавальних дій для вивчення зовнішнього середовища (виявлення різного роду дефектів). Такий опис інформації носить ієрархічну структуру. Опис робочої зони включає в себе набір планів всієї зони та її частин, які відрізняються як масштабом, точністю, так і ступенем узагальнення сенсорної інформації (візуальний огляд, звичайне дослідження ділянки, детальне дослідження з класифікацією дефекту). База знань про зовнішнє середовище включає в себе також правила, що дозволяють моделювати можливі зміни середовища. Логічні моделі базуються на апараті математичної логіки.

Інші елементи схеми також мають ієрархічну структуру, рівні яких зв'язані один з одним по вертикалі. В свою чергу показані на схемі з'єднання блоків здійснюються багатоканально між однією рівнями по горизонталі.

Блок обробки сенсорної інформації отримує з блоку пам'яті екстраполяцію зміни навколишнього середовища, а передає в нього корекцію даного стану на рівні безпосереднього сенсорного відображення середовища.

Блоки оцінки ситуації та планування поведінки системи отримують з блоку пам'яті поточну модель зовнішнього середовища, а передають в нього оцін-

ку по визначених критеріях і синтезований план управління рухами систем робота, відповідно. При синтезі цього плану використовуються різні методи вирішення задач, розроблені в рамках штучного інтелекту, в тому числі:

- пошук прийняття рішення в просторі стану (знаходження послідовності перестроювання з наявного вихідного стану в цільовий кінцевий);
- зведення задачі до підзадач (послідовне розбиття задачі на підзадачі, навіть до елементарних, розв'язок яких аналітично відомий);
- розв'язок в формі доведення теорем (формулювання задачі як теореми і її рішення на базі системи аксіом).

Блок інтелектуального інтерфейсу, окрім зв'язку з оператором, в загальному випадку повинен бути двосторонньо зв'язаний зі всіма переліченими функціональними блоками.

Особливості пересування робота по внутрішній порожнині системи трубопроводів об'язки КС полягають у тому, що модель зовнішнього середовища, в якому він рухається, представляє собою карту місцевості, яка крім апіорних даних, складається і уточняється в процесі руху на основі сенсорної інформації (системи технічного зору). Ця модель повинна мати як мінімум два рівня по масштабу: перший – в межах функціональної можливості сенсорних систем, другий – для місцевості безпосередньо перед роботом.

Модель першого рівня місцевості служить для прокладання маршруту руху, у відповідності з заданою ціллю. Варіанти цілі – рух по заданому маршруту для виконання діагностики внутрішньої поверхні труби; досягнення заданої точки, з встановлени-

ми координатами, з наступним виконанням поставлених задач.

Друга, більш детальна, модель ближньої ділянки місцевості – необхідна для уточнення маршруту безпосередньо перед роботом, враховуючи перешкоди непередбачені на карті місцевості першого рівня. В цілому це є задача забезпечення безпеки руху. Однак для гарантованого вирішення цієї задачі даного інформаційного забезпечення може бути недостатньо. Необхідне встановлення додаткової системи забезпечення безпеки руху, яка контролює кути нахилу несучих елементів корпусу, не допускаючи перевищення їх критичних значень, визначених умовами втрати стійкості; небезпечні непередбачені перешкоди, безпосередньо перед роботом

(раптові нахили, технологічні перешкоди); оцінки стану навколишнього середовища (наявність води, конденсату, механічних перешкод) та відповідно зупинка робота, по сигналу даної системи.

На рис. 2 представлена типова схема управління рухом таким роботом [1]. Блок управління рухом БУР здійснює управління тяговими приводами та приводами повороту шасі. Блок побудови маршруту – синтезує траєкторію руху, оптимізуючи її по мінімуму часу виконання завдання, коли в постановку задачі входять умови забезпечення максимальної швидкодії. Блок побудови плану місцевості представляє її в формі, зручній для розв'язання задачі вибору маршруту, зокрема з виділенням небезпечних чи незрозумілих ділянок.

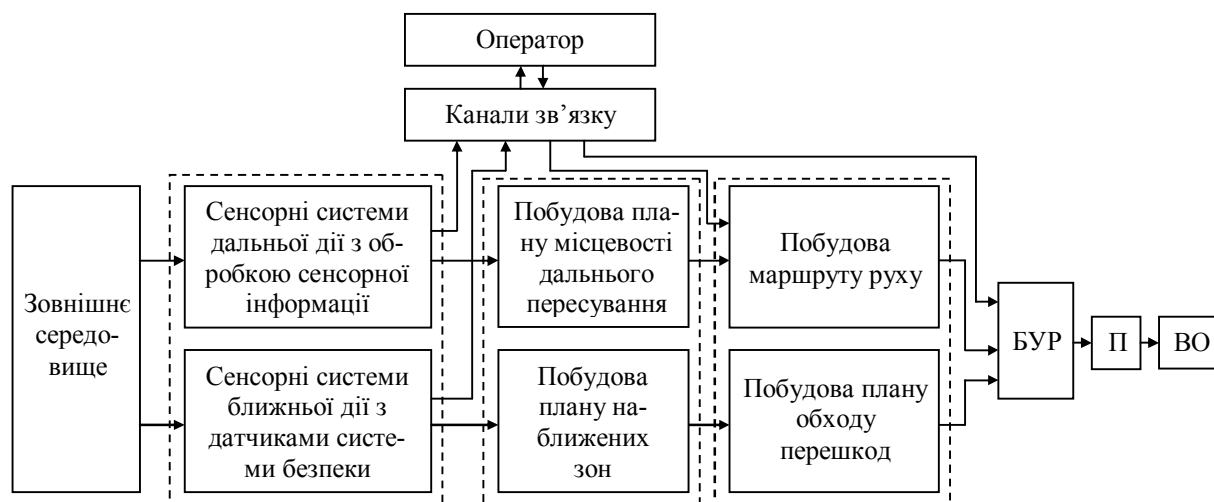


Рис. 2. Типова схема системи управління рухом робототехнічного пристрою: БУР – блок управління рухом; П – приводи; ВО – виконавчі органи

Якщо для виконання поставленої задачі необхідно більше інформації про ділянку, чим дають сенсорні системи, тоді в блок побудови маршруту сигнали передаються фрагментами по мірі пересування робота. Аналогічно такими ж фрагментами послідовно відбувається і синтез траєкторії руху.

На нижньому загальносистемному рівні системи управління знаходиться канал управління рухом в ближній зоні, що включає в себе найбільш детальну модель цієї зони і реалізовує алгоритми забезпечення безпеки руху.

Необхідний рівень адаптації і штучного інтелекту системи визначається ступінню невизначеності та складності місцевості, а також характером поставлених задач. В останньому випадку основне значення має мінімально необхідна ступінь автономності управління роботом, яка визначається переліком його дій які повинні виконуватись без втручання людини-оператора. При цьому враховується і ймовірність тимчасової втрати зв'язку з оператором, обмеження пропускну здатності каналів зв'язку,

неповнота та обмежена достовірність інформації, отриманої оператором від робота з затримкою в часі. Наприклад, при дії завади в каналі передачі, оператор не отримує зображення панорами місцевості перед роботом, він має можливість безпосередньо втручатись в автономний рух робота, для контролю і корегування маршруту руху шляхом вказування окремих проміжних точок траси в момент її спостереження.

## Проведення діагностики тіла труби

Власне діагностика внутрішньої поверхні трубопроводу здійснюється за допомогою встановленого на пристрій електромагнітно-акустичного модуля з прямим і похилим вводом ультразвукових імпульсів.

Ультразвукові коливання направляються як перпендикулярно до об'єкта контролю, що дозволяє виявляти внутрішні дефекти, орієнтовані паралельно стінкам об'єкту контролю так і під кутом 45°, - в

цьому випадку аналізуються сигнали, які здійснили дзеркальне відображення від поверхні. Це дозволяє виявляти радіально розташовані в тілі труби тріщиноподібні дефекти.

Проведення контролю тіла труби здійснюється спіральним та кільцевим скануванням з рівномірним та покроковим пересуванням пристрою. Результати сканування обробляються і виводяться на екран ПК, з метою оцінки встановлених дефектів.

Для проведення вимірювального контролю використовується відеокамера з лазерно-голографічною насадкою, по результатах обробки відзнятих зображень якої, проводиться замір дефекту.

### Висновок

Запропонована система управління роботом повинна передбачити інтелектуальне виконання діагностичних робіт пристроєм, забезпечення надійності і маневреності руху, передбачення і своєчасне усунення несправності систем та аварійних ситуацій,

оперативно здійснювати обмін інформації в залежності від поставлених завдань.

Описані методи контролю повинні дозволити виявляти дефекти різноманітного походження, визначити їх характер і розмір, відповідно класифікувати їх за ступенем небезпеки.

### Література

1. *Зенкевич С.Л. Управление роботами: учебник для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Юценко. – М., 2000. – 400 с.*
2. *Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПб., 2005. – 416 с.*
3. *Довідник працівника газотранспортного підприємства / Під ред. В.В. Розганюка, А.А. Рудника, В.М. Коломєєва. – К.: Росток, 2001. – 1092 с.*
4. *Газпром, ВНИИГАЗ. Состояние дел с НТД по ВТД, рассмотрение предложений по разработке новой и корректировке имеющейся документации по ВТД. – М.: 2009 – 14 с.*

Надійшла до редакції 11.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

### СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДОВ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

*А.П. Сташинский*

Предложена идея внедрения системы интеллектуального управления робототехническим диагностическим комплексом для проведения внутренне-трубной диагностики обвязки компрессорных станций. Приведен анализ и короткая характеристика сложности выполнения таких диагностических работ со следующим их решением с помощью предложенной методики. Проведено описание системы интеллектуального управления и характеристика ее элементов в зависимости от процесса выполнения поставленных заданий. Приведены методы их решения в рамках искусственного интеллекта. Рассмотрены особенности передвижения робототехнического устройства в рабочей среде с проведением оценки, и решением поставленных заданий, а также планированием непредвиденных обстоятельств. Предложена двухуровневая модель такого процесса и типичная схема управления движением устройства. Представлены комплексные методы проведения диагностики с помощью данной системы.

**Ключевые слова:** диагностика, робототехническое устройство, внешняя среда, искусственный интеллект, база знаний, задача, модель.

### SYSTEM OF INTELLECTUAL MANAGEMENT ROBOT-TECHNICAL DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF PIPELINES OF THE COMPRESSOR STATIONS

*O.P. Stashynsky*

The idea of introduction of the system of intellectual management a robot-technical diagnostic complex is offered for realization of inwardly-pipe diagnostics of tying around of the compressor stations. An analysis over and short description of complication of implementation of such diagnostic works is brought with their next decision by means of the offered methods. Description of the system of intellectual management and description of its elements is conducted depending on the process of implementation of the put tasks. Methods over of their decision are brought within the framework of artificial intelligence. The features of movement of robot-technical device in a working environment with realization of estimation, and decision of the put tasks, and also planning of contingences are considered. The two-tier model of such process and typical chart of traffic of device control is offered. The complex methods of realization of diagnostics are presented by means of this system.

**Key words:** diagnostics, robot-technical device, external environment, artificial intelligence, base of knowledge, task, model.

**Сташинський Олександр Петрович** – аспірант Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: ostashynskyj.ctg@naftogaz.net.

УДК 621.643:681

О.Ю. ШЕПЕЛЬ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*В статті наведена математична модель визначення стрес-корозійних дефектів на магістральних трубопроводах. Для достовірності результатів діагностики технічного стану МГ слід враховувати оцінку ступеня небезпеки дефектів з урахуванням залишкової довговічності дефектних конструктивних елементів, вибір методу діагностування, розрахунок залишкової працездатності ділянки, визначення терміну подальшого обстеження ділянки. Розглянуто зв'язок розрахункового тиску руйнування з геометричними параметрами окремого дефекту. При оцінці небезпеки декількох поруч лежачих дефектів застосовують метод перебору та виділяють з них групу послідовно розташованих дефектів. Запропонована математична модель дозволяє обчислювати термін безпечної експлуатації дефектної труби та термін контрольного виміру параметрів дефектної області.*

**Ключові слова:** математична модель, магістральні трубопроводи, стрес-корозійні дефекти, розрахунковий тиск.

### Вступ

На даний час однієї з основних проблем надійності експлуатаційних магістральних трубопроводів нафтогазової промисловості є фізичний знос трубопроводів. Висока інтенсивність аварій носить не випадковий характер їх прояву. Щоб надійно оцінити експлуатаційний термін трубопроводів, необхідний комплексний підхід, важливою складовою якого є визначення напруженого стану труби, зокрема, в місцях із дефектами та в зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70 – 80% усіх відмов на магістральних трубопроводах.

Складність ремонтно-відновлювальних робіт вимагають проведення подальших досліджень в області підвищення ефективності експлуатації трубопроводних систем, вдосконалення структур управління, організації і проведення технічного обслуговування та ремонту [1].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Усі виявлені дефекти класифікують за ступенем їх небезпеки для ухвалення обґрунтованих рішень про заміну, проведення ремонту труб або організацію спостереження за виявленими дефектами протягом встановленого терміну.

Фактори, що визначають вибір параметрів пошкодження сухопутної частини чи підводного переходу трубопроводу, наступні:

- характер ушкодження (тріщина, свищ, вм'ятина, арка, розрив по перетину і т.п.);
- геологічні та гідрогеологічні умови проходження траси (болото, глибина і ширина водойми,

швидкість течії, хвильовий режим, геологічна будова для водойми);

- техніко-економічне обґрунтування [2].

Моніторинг технічного стану МГ ґрунтується на використанні діагностичної інформації, а саме:

- проектної інформації про результати лабораторних досліджень ґрунтів, матеріалів і конструктивних елементів (КЕ), заводських випробувань виробів і устаткування, виробничої документації, приймально-здавальних випробувань МГ (потенційно руйнуючий метод діагностики - випробувальне навантаження конструкцій вище за робоче навантаження на 25 – 50%);

- інформації про поточну експлуатацію системи за матеріалами періодичних обстежень і вимірювань, спостережень (зокрема за робочим внутрішнім тиском і температурою продукту за допомогою вбудованих засобів контролю системи датчиків і контрольно-вимірювальних приладів, вмонтованих в загальну конструкцію газопроводу) за динамікою системи і навколишнього середовища в зоні розташування МГ, включаючи отримання інформації про прийняті заходи по підвищенню надійності і безпеки експлуатації системи, про ремонтні і відновлювальні роботи, аж до реконструкції системи.

Для підвищення достовірності результатів комплексної діагностики технічного стану МГ слід враховувати оцінку ступеня небезпеки дефектів з урахуванням залишкової довговічності дефектних конструктивних елементів, вибір методу діагностування, розрахунок залишкової працездатності ділянки, визначення терміну подальшого обстеження ділянки [3].

## Постановка задачі

Розробка математичної моделі для діагностики пошкоджень магістральних трубопроводів.

## Рішення задачі

Оцінимо небезпеку стрес-корозійних дефектів по максимальній глибині і довжині поздовжньої проекції дефектів.

Зв'язок розрахункового тиску руйнування з геометричними параметрами окремого дефекту має вигляд:

$$P_n = \frac{\sigma \delta}{R} \left( \frac{\delta - K_n t_{\max}}{\delta - K_n t_{\max} M_n^{-1}} \right), \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина стінки труби, мм;  $R$  – внутрішній радіус труби, мм;  $\sigma$  – напруження текучості;  $P_n$  – розрахунковий тиск руйнування труби для окремого дефекту, МПа;  $K_n$  – коефіцієнт, що враховує конфігурацію дефектів;  $t_{\max}$  – максимальна глибина дефекту, мм;  $M_n$  – коефіцієнт Фоліаса, розрахований для довжини  $L_n$ :

$$M_n = \sqrt{1 + 1,32 \frac{(L_n / 2)^2}{R \delta}}. \quad (2)$$

Попередній термін безпечної експлуатації труби з окремим дефектом визначають за формулами:

при  $t_{\max} / \tau_{\text{екс}} > V_{t \min}$

$$\tau_3 = \tau_{\text{екс}} \left( \frac{t_{\text{роб}}}{t_{\max}} - K_n \right); \quad (3)$$

при  $t_{\max} / \tau_{\text{екс}} \leq V_{t \min}$

$$\tau_3 = \frac{t_{\text{роб}} - K_n t_{\max}}{V_{t \min}}, \quad (4)$$

де  $\tau_{\text{екс}}$  – час роботи газопроводу з моменту його введення в експлуатацію до моменту обстеження, роки;  $t_{\text{роб}}$  – допустима при робочому тиску глибина прямокутної апроксимації дефекту, мм;  $V_{t \min}$  – швидкість зміни глибини дефектів мм/рік.

При оцінці небезпеки декількох поруч лежачих дефектів методом перебору виділяють з них групу послідовно розташованих дефектів, для яких розрахунковий руйнівний тиск, визначений по формулі (5) є мінімальним:

$$P_c = \frac{\sigma \delta}{R} \left( \frac{\delta \left( \sum_{n=1}^N L_{\text{деф } n} + \sum_{m=1}^M L_{\text{пер } m} \right) - K_n \sum_{n=1}^N L_{\text{деф } n} t_{\max n}}{\delta \left( \sum_{n=1}^N L_{\text{деф } n} + \sum_{m=1}^M L_{\text{пер } m} \right) - \frac{K_n \sum_{n=1}^N L_{\text{деф } n} t_{\max n}}{M_c}} \right), \quad (5)$$

де  $P_c$  – розрахунковий тиск руйнування труби з декількома дефектами, МПа;  $L_{\text{деф } n}$  – довжина  $n$ -го дефекту, мм;  $n$  – номер дефекту;  $N$  – кількість дефектів в дефектній області;  $L_{\text{пер } m}$  – довжина  $m$ -ї перемички між дефектами, мм;  $t_{\max n}$  – максимальна глибина  $n$ -го дефекту, мм;  $M_c$  – коефіцієнт Фоліаса, розрахований для довжини дефектної області:

$$M_c = \sqrt{1 + 1,32 \frac{\left( \sum_{n=1}^N L_{\text{деф } n} + \sum_{m=1}^M L_{\text{пер } m} \right)^2}{4 R \delta}}. \quad (6)$$

Отримане значення руйнівного тиску порівнюють зі значеннями, розрахованими для кожного дефекту окремо, формула (1). Якщо руйнівний тиск, визначений для будь-якого з окремих дефектів, виконують оцінку небезпеки знайденої групи дефектів по формулі:

$$\tau_3 = \frac{A_{c, \text{раб}} - A_c}{V_{A_c}}, \quad (7)$$

де  $A_{c, \text{раб}}$  – допустима при робочому тиску площа проекції дефектної області;  $A_c$  – площа втрати металу на проекції дефектної області;  $V_{A_c}$  – швидкість зміни площі втрати металу на проекції дефектної області.

В іншому випадку виконують оцінку небезпеки для окремого дефекту за формулами (3), (4).

В межах термін вимірювання параметрів дефектів, визначених по вище наведених формулах, дефектну трубу розкривають, вимірюють параметри дефектів і за отриманими даними виконують класифікацію стрес-корозійних дефектів за ступенем небезпеки.

Повздовжній переріз стінки дефектної труби розбивають на ділянки межі яких співпадають з проекціями точок вимірів глибини дефектної області і площу втрати металу для кожної ділянки. Далі обчислюють термін безпечної експлуатації дефектної труби та термін контрольного виміру параметрів дефектної області.

Приймають рішення про заміну або подальшу експлуатацію дефектної труби. Дефекти труби, що залишаються в трубопроводі, як правило усувають. Якщо усунення дефекту являється неможливим, рекомендується встановлювати закладні датчики для контролю подальшого розвитку даного дефекту.

В разі встановлення закладного датчика, періодично визначають термін безпечної експлуатації труби, у випадку якщо закладний датчик на дефекти не встановлювався, після закінчення терміну контрольного виміру параметрів дефектної області трубу розкривають, виконують контрольний вимір і знову визначають термін безпечної експлуатації дефектної труби [4].

## Висновок

В статті розглянуто математичну модель, що дає уявлення про термін безпечної експлуатації дефектної труби магістрального трубопроводу та термін контрольного виміру параметрів дефектної області.

Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (величин зносу) в обладнанні магістральних газопроводів є однією з вимог забезпечення його безаварійної експлуатації, а прогнозування залишкового ресурсу різних видів обладнання має здійснюватися з дійсної величини зносу та його характеру.

Важливим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розроблення нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності діагностичної інформації.

## Література

1. Оценка технического состояния и определение сроков безопасной эксплуатации трубопроводов / С.В. Алимов, Б.Н. Антипов, А.В. Захаров, А.Н. Кузнецов // Газовая промышленность. – 2009. – № 1. – С. 60-61.
2. Заміховський Л.М. Основи теорії надійності та технічної діагностики систем: навч. посібник / Л.М. Заміховський, В.П. Калявін. – Івано-Франківськ: Полум'я, 2004. – 230 с.
3. Завойчинский Б.И. Прогнозирование долговечности конструкций магистральных газопроводов с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности / Б.И. Завойчинский, Э.Б. Завойчинская // Газовая промышленность. – 2008. – № 9. – С. 84-87.
4. Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання / О.М. Карпаш, М.П. Возняк, В.М. Василюк. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 341 с.

Надійшла до редакції 27.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедри інформаційних технологій В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*А.Ю. Шепель*

В статье рассматривается математическая модель определения стресс-коррозионных дефектов на магистральных трубопроводах. Для достоверности результатов диагностики технического состояния МГ следует учитывать оценку степени опасности дефектов с учетом остаточной долговечности дефектных конструктивных элементов, выбор метода диагностики, расчет остаточной трудоспособности участка, определение срока дальнейшего обследования участка. Рассмотрена связь расчетного давления разрушения с геометрическими параметрами отдельного дефекта. При оценке опасности нескольких рядом лежащих дефектов применяют метод перебора и выделяют из них группу последовательно расположенных дефектов. Предложенная математическая модель позволяет вычислять срок безопасной эксплуатации дефектной трубы и срок контрольного измерения параметров дефектной области.

**Ключевые слова:** математическая модель, магистральные трубопроводы, стресс-коррозионные дефекты, расчетное давление.

## MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF PIPELINES DAMAGES

*O.U. Shepel*

In this paper a mathematical model for determining the stress-corrosion defects on the pipelines. For the diagnostic of the results of technical evaluation of pipelines should consider the risk of defects, taking into account the residual life of defective structural elements, the choice of diagnostic method, the calculation of residual disability areas, the definition of areas for further examination. The relationship between the design pressure of fracture geometric parameters single defect. In assessing the dangers lying next few defects using the method of exhaustive search and distinguish them from the group consistently located defects. The proposed mathematical model allows to calculate the term of safe exoperating costs of the defective pipe and term control measurement of the defect area.

**Key words:** mathematical model, pipelines, stress-corrosion defects, the design pressure.

**Шепель Олександра Юріївна** – аспірантка кафедри інформаційних технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

УДК 376.93

А.В. ДЗЮБАНЕНКО

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## РЕАЛІЗАЦІЯ АДАПТИВНОГО ПОШУКУ ШАБЛОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСИФІКАТОРІВ НА БАЗІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

У статті розглянуто найбільш актуальні методи реалізації адаптивного пошуку шаблонів з використанням класифікаторів на базі комп'ютерних систем цифрового відеоспостереження. Висвітлено процедуру вибору правил класифікації, для яких показана залежність від вартості помилки. Ефективність технології побудови класифікаторів визначається при вивченні поведінки ризику із зростанням числа зразків. Запропонований набір даних можна використовувати для побудови ймовірнісної моделі цим самим забезпечити швидкість пошуку певних ділянок зображення, які мають просту форму і стилізований вміст.

**Ключові слова:** цифрове телеспостереження, адаптивний пошук шаблонів, класифікатори, області рішень.

### Вступ

Існує безліч важливих задач розпізнавання об'єктів, які включають пошук на зображенні певних ділянок, які мають просту форму і стилізований вміст. Наприклад, обличчя анфас має вигляд овальної ділянки, причому при грубому масштабі всі особи виглядають приблизно однаково: темні горизонтальні смужки на рівні очей і рота, світла вертикальна смужка вздовж носа і слабо текстурні частини в районі щік і лоба. Інший приклад: для камери, встановленої в передній частині автомобіля, всі червоні знаки світлофорів виглядають однотипно.

Виходячи з наведених міркувань, напрошується такий підхід до розпізнавання об'єктів: визначити всі ділянки зображень, що мають певну форму, і перевірити їх на предмет наявності значимого об'єкта. Якщо про розміри шуканого об'єкта нічого не відомо, пошук можна проводити при різних масштабах; якщо не відома орієнтація предмета, можна додатково проводити пошук зі зміною орієнтації в просторі і т.д. У загальному випадку цей підхід називається порівнянням з шаблоном. Важливими прикладами практичної сфери застосування цієї технології є пошук осіб і визначення червоних сигналів світлофора.

### 1. Використання втрат для прийняття рішень, при побудові класифікатора для двох класів

Вибір правила класифікації повинен залежати від вартості помилки. Вартість залежить від того,

який об'єкт був помилково віднесено до якого класу. У загальному випадку результат записується як  $(i \rightarrow j)$ ; це означає, що предмет  $i$ -го типу класифікується як предмет  $j$ -го типу. Кожен результат має свою вартість, яка називається втратою. Таким чином маємо функцію втрат, яку запишемо як  $L(i \rightarrow j)$ ; це означає втрати, понесені при визначенні об'єкта  $i$ -го типу як об'єкта  $j$ -го типу. Оскільки втрати, зв'язані з правильною класифікацією, не повинні впливати на структуру класифікатора,  $L(i \rightarrow j)$  повинна дорівнювати нулю, а інші втрати є деякі позитивні величини.

Функція ризику даної стратегії класифікації – це очікувані втрати при її використанні як функції типу предмету. Сумарний ризик – це загальні очікувані втрати при використанні класифікатора. Отже, якщо дано два класи, сумарний ризик використання стратегії  $s$  запишеться як:

$$R(s) = \Pr(1 \rightarrow 2 | \text{при використанні } s) L(1 \rightarrow 2) + \Pr(2 \rightarrow 1 | \text{при використанні } s) L(2 \rightarrow 1).$$

Бажаною є стратегія, яка мінімізує сумарний ризик. Необхідно побудувати класифікатор для двох класів, що дозволить реалізувати цю умову.

Припустимо, що класифікатор може вибирати з двох класів, а також задана функція втрат. У просторі ознак є межа (яку назвемо границя областей рішень), коли точки по один бік границі належать до класу один, а точки з іншого боку до класу два.

Визначимо межу областей рішень. Справедливо, що для точок на границі областей рішень оптимального класифікатора вибір будь-якого класу має однакові очікуємі втрати; якщо це не так, можна отримати кращий класифікатор, віднівши точку до

одного з класів, відповідно, перемістивши границю.

Вибір класу один для точки  $x$  на кордоні області рішень дає такі очікувані втрати:

$$P\{\text{клас} - 1 | x\} L(2 \rightarrow 1) + P\{\text{клас} - 2 | x\} L(1 \rightarrow 1) = \\ = P\{\text{клас} - 2 | x\} L(2 \rightarrow 1) + 0 = p(2|x) L(2 \rightarrow 1).$$

Тут слід дуже акуратно стежити за цифрами "1" і "2". Подібним чином, якщо віднести цю ж точку до класу два, отримаємо такі очікувані втрати:

$$P\{\text{клас} - 1 | x\} L(1 \rightarrow 2) = p(2|x) L(1 \rightarrow 2),$$

причому отримані два вирази повинні бути рівними. Це означає, що границя областей рішень складається з точок  $x$ , де:

$$p(1|x) L(1 \rightarrow 2) = p(2|x) L(2 \rightarrow 1).$$

Використовуючи теорему Байеса, можна прийти до більш зручного виразу:

$$\frac{p(x|1)p(1)}{p(1)} L(1 \rightarrow 2) = \frac{p(x|2)p(2)}{p(x)},$$

позбудемося знаменників і отримаємо:

$$p(1|x)p(1)L(1 \rightarrow 2) = p(x|2)p(2)L(2 \rightarrow 1).$$

Останній результат – це рівняння точок  $x$ , що лежать на границі класів; тепер потрібно визначити, яким чином класифікувати точки, що лежать не на границі.

Для точок, які не належать границі, слід вибрати клас з найменшими очікуваними втратами. Нагадаємо, що якщо точку  $x$  віднести до класу два, очікувані втрати складуть:

$$p(1|x) L(1 \rightarrow 2),$$

і т.д. Це означає, що клас один слід вибирати в тому випадку, якщо:

$$p(1|x) L(1 \rightarrow 2) \geq p(2|x) L(2 \rightarrow 1),$$

а клас два – якщо:

$$p(1|x) L(1 \rightarrow 2) < p(2|x) L(2 \rightarrow 1).$$

## 2. Класифікатор для більшого числа класів

Далі будемо припускати, що  $L(i \rightarrow j)$  дорівнює нулю при  $i = j$  і одиниці – в інших випадках; тобто всі результати мають однакові втрати. У деяких задачах це не так – тоді варто не відносити об'єкт ні до якого класу. Подібне рішення також включає деякі втрати, причому передбачається, що вони  $d < 1$ .

В алгоритмах оснований на класифікаторах Байеса – найкраща стратегія для вибраної функції втрат. Сумарний ризик, пов'язаний з цим правилом, називається байєсовим ризиком; це найменший можливий ризик, який можна отримати при використанні класифікатора. Записати це правило в явному

виді можна лише в кількох випадках. Як видно з рис. 1, ризик Байеса рідко буває рівним нулю.

## 3. Явні ймовірнісні моделі

Запропонований набір даних можна використувати для побудови ймовірнісної моделі.

На рис. 1 величина  $p(\text{клас} | x)$  зображена як функція ознаки  $x$  (межа області прийняття рішень). Межі класифікатора позначені в припущенні, що  $L(1 \rightarrow 2) = L(2 \rightarrow 1)$ . У даному випадку Байеса ризик являє собою суму величин апостеріорних ймовірностей попадання представника класу один в область класу два і попадання представника класу два в область класу один (позначені штриховкою).

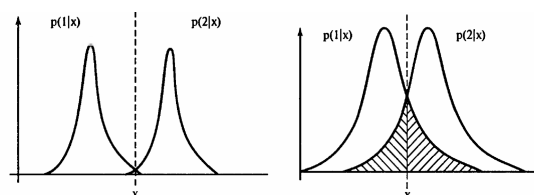


Рис. 1. Типові елементи задачі класифікації за наявності двох класів

У простому випадку відомо, що щільності умовних ймовірностей приналежності до класу підкоряються відомому параметричному розподілу. У такому випадку по набору даних можна оцінити параметри і застосувати до цих оцінок теорему Байеса. Підібраний підхід часто називається змінним класифікатором (plug-in classifier). Однією з тонкощів цієї стратегії є те, що оцінки параметрів можуть не давати найкращого класифікатора, оскільки параметрична модель може бути неточною. Інша тонкість – це те, що хороший класифікатор можна отримати, використовуючи параметричну модель щільності, яка не є точним описом даних (рис. 2). Для отримання більш гнучких моделей слід використовувати більш складні засоби.

## 4. Пряме визначення меж областей рішень

Як видно на рис. 2, досить погані ймовірнісні моделі можуть давати гарні класифікатори. Це пояснюється тим, що якість класифікатора визначають межі областей рішень, а не подробиці ймовірнісної моделі (основне, для чого потрібно ймовірнісна модель в класифікаторі Байеса – визначення меж областей рішень).

Пунктиром показана оптимальна межа областей рішень. Зверніть увагу, що хоча нормальна функція розподілу може сильно відрізнятися від функцій апостеріорних ймовірностей, якість відповідного класифікатора залежить тільки від того, наскільки

точно вона пророкує положення кордонів. В даному випадку, замінюючи апостеріорні ймовірності функцією нормального розподілу, можна отримати досить хороший класифікатор.

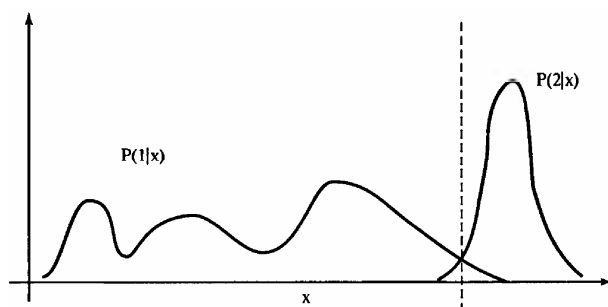


Рис. 2. Щільності апостеріорних ймовірностей для двох класів

Звідси напрошується пропозиція не звертати уваги на вірогідну модель та спробувати побудувати межі областей рішень. Такий підхід часто дає вдалі результати. В одній з можливих стратегій передбачається, що кордон областей рішень породжується з яких-небудь класів. Для неї формулюється задача знаходження екстремуму, при вирішенні якої вибирається найкращий елемент цього класу.

## Висновки

Ефективність технології побудови класифікаторів визначається при вивченні поведінки ризику із зростанням числа зразків (наприклад, може вимагатися, щоб функція ризику сходилася за ймовірністю до ризику Байєса при збільшенні числа зразків).

Розглянуто структуру комп'ютерної системи аналізу зображень, до складу якої входять компоненти для навчання та тестування, охоплені зворотним зв'язком, за рахунок чого підвищується адаптивність системи до змін характеристик зображень, які нею аналізуються.

## Литература

1. Бузовский О.В. Компьютерная обработка изображений / О.В. Бузовский. – К.: Корнійчук, 2001. – 180 с.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
4. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: пер. с англ. / Б.К.П. Хорн. – М. Мир, 1989. – 487 с.

Поступила в редакцію 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

## РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО ПОИСКА ШАБЛОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАССИФИКАТОРА НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

*А.В. Дзюбаненко*

В статье рассмотрены наиболее актуальные методы реализации адаптивного поиска шаблонов с использованием классификаторов на базе компьютерных систем цифрового видеонаблюдения. Освещены процедуру выбора правил классификации, для которых показана зависимость от стоимости ошибки. Эффективность технологии построения классификаторов определяется при изучении поведения риска по росте числа образцов. Предложенный набор данных можно использовать для построения вероятностной модели этим самым обеспечить скорость поиска определенных участков изображения, имеющих простую форму и стилизованное содержимое.

**Ключевые слова:** цифровое теленаблюдения, адаптивный поиск шаблонов, классификаторы, области решений.

## REALIZATION ADAPTIVE SEARCH TEMPLATE USING CLASSIFIER BASED ON COMPUTER SYSTEMS DIGITAL VIDEO

*A.V. Dzyubanenko*

The article reviews the most current methods of adaptive search pattern classifiers using computer-based digital video surveillance systems. Deals with the classification rules of procedure of choice for showing the dependence of the cost of error. Effectiveness of the technology to build the classifiers defined in the study of risk behavior with growing numbers of samples. The proposed set of data can be used to build probabilistic models thus to speed the search certain areas of the images that have a simple form and stylized content.

**Key words:** digital telesupervision, adaptive search patterns, classifiers, regions of decisions.

**Дзюбаненко Андрій Васильович** – аспірант кафедри інформаційних технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: dzubanenko\_av@ukr.net.

УДК 681.786(045)

Л.М. ПОКИДЬКО

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОЮ ГОЛОВКОЮ ПРИ КОНТРОЛІ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СКЛАДНОЮ ПРОСТОРОВОЮ ПОВЕРХНЕЮ

*У статті розглянуто задачу дослідження точності руху лазерного променя під час контролю геометричних розмірів деталі при роботизованому керуванні лазерною головкою. Задача дослідження точності руху полягає в аналізі динаміки похибки руху вимірювальної системи. Представлена структурна схема системи контурного керування рухом лазерною головкою роботизованої лазерної вимірювальної системи. Обробку даних з метою визначень коефіцієнтів ряду Фур'є зручно виконувати за допомогою програми, що реалізується в системі MATLAB. Показано, що точність вимірювання геометричних розмірів деталей зі складною просторовою поверхнею підвищується на 25 – 35%.*

**Ключові слова:** лазерні вимірювальні системи, матриця перетворення Якобі, координати Френе, оцінка похибки, допустиме відхилення, прецизійні оптичні методи вимірювання.

### Вступ

Прецизійні оптичні методи вимірювання широко застосовуються практично в усіх областях науки і техніки.

Це пояснюється тим, що дані методи є неконтактними, дистанційними, високочутливими, вони стійкі до електромагнітних перешкод, забезпечують реєстрацію параметрів швидкоплинних процесів, дозволяють проводити вимірювання широкого діапазону параметрів.

Промислові лазерні вимірювальні системи дозволяють здійснювати безконтактні вимірювання геометричних розмірів і форми сировини, заготовок, деталей та готової продукції в процесі виробництва безпосередньо на конвеєрі або на виробничій лінії з мікронною точністю.

Лазерні вимірювальні прилади можна встановити безпосередньо на устаткування для обробки з метою контролю його положення або активного контролю якості.

Існують моделі для екстремальних навколишніх умов (висока температура, радіоактивність, системи охолодження тощо).

Прецизійність переміщення променя лазера в просторі забезпечується комп'ютерними системами керування і механізмами переміщень, що забезпечують точність позиціонування від мікрона до сотень мікрон.

### Основний матеріал

Для забезпечення точності розмірів деталі необхідно забезпечити точність керування рухом ласе-

рної головки роботизованої лазерної вимірювальної системи. Реалізація цієї задачі потребує пошуку раціональних алгоритмів формування керуючих дій на виконавську систему робота, що забезпечують найбільшу продуктивність при необхідній точності рухів.

Найбільш прийнятним методом є метод узгодженого керування [1, 2], що базується на використанні в структурі регулятора диференційно-геометричних параметрів заданої лінії контуру. При цьому в структуру регулятора вводяться ланцюги зворотних зв'язків по відхиленнях лазерного променя від лінії контуру, вимірювані в рухливих координатах відповідно до переміщенням променя уздовж контуру об'єкту.

При організації руху лазерного променя уздовж заданої поверхні поточне відхилення вимірюється по нормалі до цієї поверхні.

Рух лазерної головки роботизованої лазерної вимірювальної системи повинен виконуватися при трьох максимальних швидкостях та одній уповільненій.

Розглянемо динамічну модель, що відповідає повільному руху головки роботизованої лазерної вимірювальної системи:

$$F\dot{q} = u, \quad (1)$$

де  $q = \{q_j\}$  – вектор узагальнених координат;

$u = \{u_j\}$  – вектор керування (тут – вхідних сигналів лінійних двигунів з газовим змащенням),

$$j = \overline{1, m};$$

$F$  – обернена матриця.

Вектор декартових координат  $y = \{y_j\}$  кінцевої точки датчика визначається відомим рівнянням прямої кінематики

$$y = c(q),$$

поточне відхилення від лінії контуру  $S$  об'єкта характеризується виразом

$$e = \varphi(y), \quad (2)$$

а подовжній рух

$$S = \psi(y), \quad (3)$$

де  $S = \{S_j\}, j = \overline{1, m-1}$ .

Вважаємо, що функції  $\varphi(y), \psi(y)$  обрані так, що  $e(t)$  є ортогональним відхиленням,  $S(t)$  – довжиною шляху координатної лінії поверхні, а матриця перетворення Якобі

$$M = \begin{vmatrix} \partial\psi / \partial y \\ \partial\varphi / \partial y \end{vmatrix}$$

не вироджена, тобто  $\det M \neq 0$ .

Первинна постановка задачі керування просторовим рухом лазерної головки роботизованої лазерної вимірювальної системи передбачає усунення відхилення  $e(t)$  (або стабілізацію його заданого значення) і забезпечення бажаного режиму подовж-

нього руху  $S(t)$ , що задається профілем подовжніх (контурних) швидкостей

$$V_j^* = \dot{S}_j^*(t).$$

Структурна схема системи контурного керування рухом лазерною головкою роботизованої лазерної вимірювальної системи представлена на рис.1 та містить основний регулятор

$$u = FC_q^{-1} M^{-1} \begin{bmatrix} V^* \\ u_e \end{bmatrix},$$

із зворотними зв'язками по відхиленнях

$$u_e = -Ke,$$

де  $C_q$  – матриця, обумовлена кінематичною схемою трикоординатної ІВС механічних величин;  $K$  – коефіцієнт зворотного зв'язку.

Така система гарантує бажаний режим подовжнього руху зі швидкістю  $\dot{S} = V^*$  та високу точність просторового переміщення (0,1 мкм) відповідно до моделі динаміки відхилень

$$\dot{e} + Ke = 0.$$

Відхилення  $e(t)$  може бути розраховане на основі зовнішніх вимірів декартових координат  $y_j$ , згідно виразу (2), або безпосередньо виміряне за допомогою оптичних датчиків в координатах Френе.

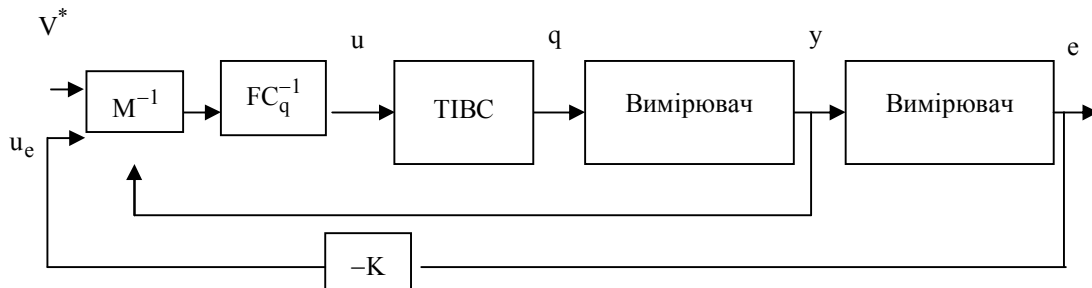


Рис. 1. Структурна схема трикоординатної ІВС контурного керування оптичними датчиками лінійних переміщень

Задача дослідження точності руху лазерного променя під час контролю геометричних розмірів деталі при роботизованому керуванні лазерною головкою полягає в аналізі динаміки похибки  $\delta$  руху вимірювальної системи. Структура лінеаризованої математичної моделі [3] такої системи має три зовнішні впливи: швидкість повздовжньої подачі  $\Delta V_3$ ; відхилення від номінальних значень керуючого впливу поперечної подачі  $\Delta Y_3$ ; шорсткість деталі  $\Delta Y_{\text{дт}}$ . Вони впливають на похибку  $\delta$  руху лазерної вимірювальної системи відносно запрограмованої тра-

екторії  $y$  відповідності з рівнянням

$$\delta = W_1(p)\Delta V_3 + W_2(p)\Delta Y_3 + W_3(p)\Delta Y_{\text{дт}},$$

де  $W_1(p), W_2(p), W_3(p)$  – передаточні функції каналів зовнішнього впливу.

Як бачимо з рівняння похибка  $\delta$  має три складові:

$$\delta_1 = W_1(p)\Delta V_3;$$

$$\delta_2 = W_2(p)\Delta Y_3;$$

$$\delta_3 = W_3(p)\Delta Y_{\text{дт}},$$

які можуть мати різні знаки. Тому для забезпечення точності контролю геометричних параметрів деталей доцільно розглядати оцінку  $\delta_{\max}$  максимального значення похибки  $\delta$ , що залежить від максимально можливих значень  $\delta_{1\max}$ ,  $\delta_{2\max}$ ,  $\delta_{3\max}$  складових  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ :

$$\delta_{\max} = |\delta_{1\max}| + |\delta_{2\max}| + |\delta_{3\max}| \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (4)$$

де  $\delta_{\text{доп}}$  – допустиме відхилення лазерного променя від запрограмованої траєкторії. Нерівність (4) показує, що дослідження точності руху лазерного променя по поверхні деталі можна здійснити в результаті незалежного впливу на похибку  $\delta$  кожного із трьох вхідних впливів з подальшим їх сумуванням.

Аналіз впливу кожного із впливів системи на похибку  $\delta$  базується на використанні частотних методів і передбачає наступні кроки:

- вибір номінального значення контурної швидкості руху головки роботизованої лазерної виміральної системи;
- визначення значень параметрів вихідної математичної моделі роботизованої лазерної виміральної системи;
- визначення значень параметрів передаточної функції;
- оцінка похибки  $\delta_{\max}$ .

Для визначення спектра зовнішнього впливу  $\Delta Y_{\text{дт}}$ , розкладемо його як функцію часу в ряд Фур'є

$$\Delta Y_{\text{дт}}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \phi_k).$$

Вважатимемо, що функція  $\Delta Y_{\text{дт}}$  визначена на проміжку часу від 0 до  $T$ , який розбито на  $N$  інтервалів довжиною  $\Delta t$ , на межі яких значення  $\Delta Y_{\text{дт}}(t_i)$  фіксовані. За межами цього проміжку функція є періодично продовженою.

Для практичного застосування значень коефіцієнтів ряду Фур'є доцільно скористатись алгоритмом, який призначений для реалізації за допомогою комп'ютеризованих систем, що передбачає наближене інтегрування по методу прямокутників і характеризується наступними формулами:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (5)$$

$$\phi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}; \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \Delta Y_{\text{дт}}(t_i) \sin \omega_k t_i; \quad (7)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \Delta Y_{\text{дт}}(t_i) \cos \omega_k t_i; \quad (8)$$

де  $\omega_k$  – циклічна частота гармоніки з номером  $k$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ .

В умовах експерименту лазерний промінь проходить відомий шлях  $L$  зі швидкістю  $V_0$ , тоді

$T = \frac{L}{V_0}$  – час, що затрачається на вимірювання:

$$\omega_k = V_0 \cdot \frac{2\pi k}{L}. \quad (9)$$

Отже, як бачимо, значення частот всіх гармонік пропорційне значенню швидкості  $V_0$ . Із формул (5) – (8) слідує, що амплітуди гармонік не залежать від швидкості  $V_0$ .

Обробку даних з метою визначень коефіцієнтів ряду Фур'є зручно виконувати за допомогою програми, що реалізується в системі MATLAB. Ця програма формує масив амплітуд  $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ . Вихідними даними для обчислення масиву є  $\{\Delta Y_{\text{дт}}(0), \Delta Y_{\text{дт}}(t_1), \dots, \Delta Y_{\text{дт}}(t_N)\}$ . Графічна побудова спектру впливу  $\Delta Y_{\text{дт}}$  здійснюється програмою Excel.

## Література

1. Квасников В.П. Управление оптическими датчиками при высокоточных измерениях геометрических параметров деталей / В.П. Квасников // Вісник Інженерної академії України. – 2008. – № 2. – С. 92-94.
2. Застрогин Ю.Ф. Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера / Ю.Ф. Застрогин. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
3. Броккет Р.У. Алгебры Ли и группы в теории управления. Математические методы в теории систем / Р.У. Броккет. – М.: Мир, 1979. – 320 с.

Надійшла до редакції 25.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

**УПРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКОЙ  
ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕТАЛЕЙ СО СЛОЖНОЙ  
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

*Л.М. Покидько*

В статье рассматривается задача исследования точности движения лазерного луча при контроле геометрических размеров детали при роботизированном управлении лазерной головкой. Задача исследования точности движения состоит в анализе динамики погрешности движения измерительной системы. Представлена структурная схема системы контурного управления движением лазерной головкой роботизированной лазерной измерительной системы. Обработку данных с целью определений коэффициентов ряда Фурье удобно выполнять с помощью программы, которая реализуется в системе MATLAB. Показано, что точность измерения геометрических параметров деталей со сложной пространственной поверхностью повышается на 25 – 35%.

**Ключевые слова:** лазерные измерительные системы, матрица преобразования Якоби, координаты Френе, оценка погрешности, допустимое отклонение, прецизионные оптические методы измерения.

**CONTROL OF LASER MEASURING HEAD FOR THE CONTROL  
OF PARTS WITH COMPLEX SPATIAL SURFACE**

*L.M. Pokid'ko*

The problem of research precision laser beam movement during the controls helmets rychnyh-sized parts with robotic control of the laser head. The task of research-considered accurate movement is to analyze the dynamics of error motion measurement system. Submitted block diagram of contour motion control laser head robotized laser measurement system. Data processing for Fourier coefficients of the definitions easily perform using that system is implemented in MATLAB. Shown that the accuracy of geometric-Ro zmiriv parts with complicated spatial surface increases by 25-35%

**Key words:** laser measuring system, the transformation matrix of Jacobi, coordinates Frene, error estimation, the tolerance, precision optical measurement methods.

**Покидько Людмила Миколаївна** – провідний інженер кафедри інформаційних технологій інституту інформаційно-діагностичних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: mila.list@yandex.ua.

УДК.62-52

Г.П. МИХНЕВА

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

*Проведен анализ существующих методов управления измерительной головкой, применяемых в автоматизированных системах управления координатно-измерительными машинами. Выявлено, что сокращение времени на измерение детали, в условиях априорной неопределенности, при управлении движением измерительной головки КИМ можно достичь путем применения принципа адаптивного управления. В соответствии с принципом адаптивного управления разработана функциональная схема автоматизированной системы адаптивного управления измерительной головкой на базе ассоциативной памяти.*

**Ключевые слова:** адаптивное управление, методы адаптации, измерительная головка координатно-измерительной машины.

### Введение

В условиях современного производства в таких отраслях, как общее машиностроение, авиационная и аэрокосмическая промышленность, требования к точности и скорости измерений непрерывно повышаются. При изготовлении различных деталей для таких отраслей зачастую возникает необходимость производить контроль качества их изготовления. В связи с этим ставится задача измерения пространственных объектов и обработки результатов этих измерений.

На сегодняшний день для этих целей применяются различные типы координатно-измерительных машин (КИМ), в ходе измерений которыми решается ряд задач, таких как: эффективность, достоверность и быстродействие процесса измерения. Эффективность и быстродействие зависит как от технических и метрологических характеристик базовой аппаратной части КИМ, так и от функциональной схемы управления.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Измерение на координатно-измерительных машинах представляет собой последовательность процессов контактирования наконечника измерительной головки (ИГ) с деталью, ввода, индикации и запоминания координатных данных, расчета геометрических параметров деталей, расчета размеров и взаимного расположения, расчета отклонений фактических параметров от заданных номинальных значений.

В современных КИМ все основные процессы измерений автоматизированы. Управление автоматизированными КИМ осуществляется с помощью

систем программного управления [1 – 3].

Анализ существующих систем программного управления показал, что существующие системы реализуют способ управления, при котором применяется классический подход с использованием аналитического аппарата. Данный способ управления, применяют, когда априорно достаточно точно известно все о внешней среде и об объекте измерения, и это позволяет заранее спланировать и запрограммировать процесс измерения [4, 5]. В условиях же априорной неопределенности процесс измерения объекта, при таком управлении, характеризуется, в первую очередь, большим затратам времени на измерение, что снижает эффективность процесса.

### Постановка задачи

Разработка функциональной схемы управления КИМ, позволяющей увеличить скорость измерения параметров детали с наименьшей погрешностью измерений в условиях априорной неопределенности.

### Решение задачи

Для сокращения времени на измерение детали необходимо оперативно получать информацию об объекте измерения, непосредственно в ходе выполнения операций для использования ее в реальном масштабе времени при управлении движением измерительной головки КИМ. Этого можно достичь путем применения принципа адаптивного управления с элементами искусственного интеллекта.

В настоящее время, одним из перспективных методов искусственного интеллекта являются мето-

ды нейронных сетей [6, 7]. В частности, конкурентный метод и метод самообучающихся нейронных сетей. Нейронные сети смогут обеспечить системе управления такие свойства как: обучение и обобщение, адаптивность, ассоциативность, очевидность ответа, отказоустойчивость, что позволит спроектировать систему адаптивного управления в условиях априорной неопределенности.

Применение данных методов в автоматизированных системах управления КИМ подразумевает выделение наиболее важных свойств рассматриваемых объектов, и в зависимости от значений данных свойств, выделение классов. Увеличение количества априорных классов для нейронной сети позволит значительно сократить объем вычислений, по сравнению с вычислениями, которые основаны на аналитических методах операционного исчисления. Также, важной особенностью работы нейронной сети является ее естественная способность к обучению, которая дает большую степень адаптивности.

Существует несколько способов адаптации. При определении значений заранее неизвестных или варьируемых параметров для ввода их в управляющую программу системы применяется параметрическая адаптация. В этом случае адаптивное управление является надстройкой над системой программного управления, осуществляя ее самонастройку. При изменении (переключении) структуры системы управления, т.е. ее алгоритма, на основе оценки текущей обстановки, применяется структурная адаптация (самоорганизация системы);

Для решения поставленной задачи предлагается применить иерархическую комбинацию из перечисленных способов адаптации. А именно над уровнем параметрической адаптации, осуществляющим подстройку системы программного управления, расположить уровень структурной адаптации, осуществляющий дискретное изменение в схеме последней по мере исчерпания возможности подстройки.

Принцип адаптивного управления может применяться как в системе совместного управления приводами манипулятора робота, так и в системе управления отдельных приводов.

В данной работе будет рассмотрен принцип адаптивного управления в системе управления отдельных приводов, а именно, измерительной головкой КИМ. В этом случае системы управления КИМ в целом его исполнительных устройств не становятся адаптивными, оставаясь системами программного управления, т.к. адаптация при этом относится не к общесистемным, а к локальным переменным.

В соответствии с предложенным принципом адаптивного управления разработана функциональная схема системы адаптивного управления измерительной головкой на базе ассоциативной памяти (рис. 1).

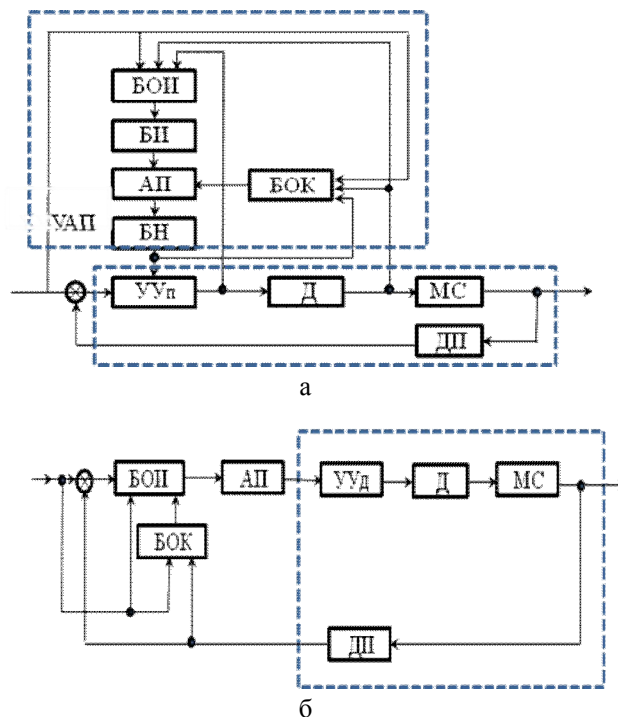


Рис. 1. Система адаптивного управления привода с ассоциативной памятью: а – в контуре подставки; б – в основном контуре управления, БИ – блок идентификации, АП – ассоциативная память, БН – блок настройки, БОК – блок оценки качества, АП – устройство адаптивной подстройки.

Устройство адаптивной подстройки УАП стабилизирует определенный показатель качества управления (колебательность, быстродействие и т.п.), выбирая из заранее введенного в ассоциативную память АП набор настроек устройства управления привода УУп, соответствующую данным значениям варьируемых параметров нагрузки и самого привода. Нужная настройка выбирается из ассоциативной памяти в функции от текущего состояния объекта управления, которое определяется в блоке идентификации по информации, поступающей с объекта. Так как этой информации заведомо недостаточно для осуществления теоретически точной идентификации, здесь применены эвристические алгоритмы идентификации по неполной информации, разработанные с помощью экспертных знаний. Блок оценки качества БОК управляет ассоциативной памятью, открывая ее для очередной записи новой информации при определенном изменении показателя качества.

На рис. 1, б показан вариант схемы, где блок ассоциативной памяти АП введен в основной контур управления и не подстраивает его, а сам выдает управляющие воздействия. Обе схемы должны проходить этап обучения экспериментами, во время которого происходит заполнение ассоциативной памяти набором ситуаций и соответствующих им оптимальных решений.

## Выводы

1. Применение принципа адаптивного управления позволит расширить функциональные возможности КИМ при выполнении измерений, не решаемых программно, и повысить эффективность эксплуатации КИМ в условиях априорной неопределенности.

2. Предложенная иерархическая комбинация параметрического и структурного способов адаптации позволит выполнить самонастройку и самоорганизацию системы управления.

3. Разработанная схема адаптивного управления измерительной головкой (КИМ) позволит обеспечить значительное сокращение сроков выполнения работ, повышение их качества и конкурентоспособности.

## Литература

1. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами / Е.И. Юревич – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 171 с.

2 Координатные измерительные машины и их применение / А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов, З.А. Раманаускас и др.; под ред. А.А. Гапишис. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

3 Будгинас С.Ю. Система программирования для автоматизированных координатных измерительных машин / С.Ю. Будгинас, В.А. Романаускас, Р.Ю. Техкунас // Станки и инструменты. – 1982. – № 3. – С. 15-17.

4. Макаров И.М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 т. / И.М. Макаров, В.М. Назаретов, Д.П. Ким. – М.: Высшая школа, 1986. – Т. 6: Техническая имитация интеллекта. – 1986. – 144с.

5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Саймон Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

6. Тимофеев А.В. Интеллектуальные системы автоматического управления / А.В. Тимофеев, Р.М. Юсупов // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 23-27.

7. Развитие технологии экспертных систем для управления интеллектуальными роботами / Г.Н. Лебедев, В.М. Лохин., Р.У. Мадыргулов и др. // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 6. – С. 34-38.

Поступила в редакцию 26.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры Информационных технологий В.П. Квасников, Институт информационно-диагностических систем, Национальный авиационный университет, Киев.

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ МАШИНАМИ

*Г.П. Михнева*

Проведено аналіз існуючих методів управління вимірювальної головкою, що застосовуються в автоматизованих системах управління координатно-вимірювальними машинами. Виявлено, що скорочення часу на вимірювання деталі, в умовах априорної невизначеності, при управлінні рухом вимірювальної головки КИМ можна досягти шляхом застосування принципу адаптивного управління. Відповідно до принципу адаптивного управління розроблена функціональна схема автоматизованої системи адаптивного управління вимірювальної головкою на базі асоціативної пам'яті.

**Ключові слова:** адаптивне управління, методи адаптації, вимірювальна головка координатно-вимірювальної машини.

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM COORDINATE-MEASURING MACHINES

*G.P. Mikhneva*

The analysis of existing data management techniques measuring head used in automated control systems coordinate measuring machines. Revealed that the reduction of time to measure the details of a priori uncertainty for motion control sensor head coordinate measuring machine can be achieved by applying the principle of adaptive management. In accordance with the principle of adaptive management developed a functional diagram of an automated system for adaptive control measuring head on the basis of associative memory.

**Key words:** adaptive control, adaptation methods, the measuring head coordinate-measuring machine.

**Михнева Галина Петровна** – преподаватель кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: M--Galina@yandex.ru.

УДК 681.2 (043.2)

Т.С. МІЦАЙ, М.А. ТИМОФІЄВА

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## АЛГОРИТМ РУХУ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ВЗДОВЖ ЗАДАНОЇ ТРАЄКТОРІЇ

*Проведено аналітичний огляд існуючих алгоритмів керування автономним мобільним роботом. Виявлено, що всі розглянуті алгоритми мають недоліки, пов'язані з неможливістю організувати рух по широкому спектру траєкторій, в результаті чого стає неможливо організувати переміщення мобільного робота вздовж заданої траєкторії. В роботі була розроблена автоматизована система керування мобільним роботом, що може переміщатися з однієї точки зовнішнього середовища в іншу по розрахунковій траєкторії з заданою траєкторною швидкістю. Також розроблено алгоритм організації руху мобільного робота в навколишньому просторі.*

**Ключові слова:** мобільний робот, планування траєкторії, зовнішнє середовище, модель руху, система керування, цільова функція.

## Вступ

Загальна процедура конструювання систем керування мобільним роботом (МР) передбачає організацію його цілеспрямованого пересування і зводиться до оперативного вирішення як мінімум трьох задач: адекватного сприйняття інформації про зовнішнє середовище і внутрішній стан об'єкту; планування оптимальної траєкторії переміщення МР в певному середовищі; ефективного виконання роботом дій, що були сплановані в реальному середовищі [1].

Тому, структурна організація МР передбачає існування сенсорної підсистеми, що включає датчики зовнішньої інформації (лазерні далекоміри, системи навігації, телевізійні камери і т.п.); блоку датчиків внутрішньої інформації (датчики кутів повороту виконуючих пристроїв, датчики кутових швидкостей коліс, осей і т.п.); блоку планування переміщень в просторі зовнішніх координат відповідно до вибраного критерію (нейронні мережі, системи прийняття рішень, системи знань, програмні траєкторії і т.д.); механічної системи робота; виконуючих пристроїв робочих органів, що здійснюють переміщення механічної системи і впливають на зовнішнє середовище та блоку тактичного керування, що забезпечує переміщення про траєкторії, за допомогою синтезованих алгоритмів керування [2].

Надалі набір координат, що однозначно описує положення МР в просторі зовнішніх (зв'язаних, базових, інерційних, абсолютних) координат називатимемо вектором зовнішніх координат  $u$ , а набір безпосередньо керованих координат – вектором внутрішніх координат  $z$ .

В роботі [3] представлені алгоритми керування

МР і відповідна їм структурна схема, яка складається з блоку планування переміщення робота в просторі зовнішніх координат, блоку визначення знаку лінійної швидкості, блоку обчислення тригонометричних функцій, двох блоків додавання і трьох блоків перемножування.

Відомий алгоритм керування МР з автомобільною конструкцією візка, що дозволяє врахувати динамічні властивості МР, а отже, дозволяє підвищити точність відпрацьованих траєкторій без введення додаткових вимог щодо траєкторної швидкості.

Також розроблено експоненціальний алгоритм керування, що дозволяє організувати рух МР уздовж траєкторій, що представлені відрізками прямих і дугами кіл із заданою траєкторною швидкістю.

Але всі ці алгоритми не дозволяють досягти бажаного результату. Причини, що перешкоджають цьому полягають в наступному: одержані алгоритмічні рішення не дозволяють організувати рух по широкому спектру траєкторій із заданою траєкторною швидкістю і здійснити переміщення робота вздовж заданої траєкторії в задану точку позиціонування. Запропоновані алгоритми керування не враховують впливу динамічних ефектів на якість відпрацювання заданих траєкторій. Тобто, з одного боку, запропонована в даних роботах організація рухів звужує функціональні можливості робота, а з іншою – не відпрацьовує додаткову динамічну похибку, що визначається інерційними властивостями робота.

## Постановка задачі

Проаналізувавши описані вище алгоритми систем керування МР, була поставлена задача розроблення системи керування мобільним роботом, що

може переміщатись з однієї точки середовища в іншу по розрахованій траєкторії з заданою контурною (траєкторною) швидкістю. А також підвищення точності планування траєкторії руху робота та розширення його функціональних можливостей.

### Розв'язання задачі

Нехай математична модель мобільного робота буде представлена наступними нелінійними диференціальними рівняннями:

$$\dot{z} = F(z, r) + B(z) \cdot U; \quad (1)$$

$$\dot{y} = M(y, z, b) = (M_1, M_2, \dots, M_m)^T, \quad (2)$$

де  $z$  – вектор внутрішніх координат,  $z \in R^n$ ;  $F(z)$  – вектор-функція нелінійних компонентів, що визначає особливості динаміки робота;  $r$  – вектор змінних параметрів робота,  $r = r' \pm [\Delta r^+, \Delta r^-]$ , де  $r'$  – вектор відомих номінальних значень параметрів,  $\Delta r^\pm$  – визначають відомий діапазон зміни параметрів відносно своїх номінальних значень;  $B(z)$  – невідроджена  $(n \times n)$ -матриця коефіцієнтів керування;  $U$  –  $n$ -вектор керування;  $y$  – вектор координат положення МР в просторі,  $y \in R^m$ ;  $M(y, z, r)$  – вектор-функція статичних нелінійностей, що визначає положення і орієнтацію робота в базовій системі системи координат.

Нехай матриця Якобі моделі (2)

$$R = \frac{\partial M^*}{\partial z^T}, \quad (3)$$

що є похідною вектора-стовпця зовнішніх координат по вектору-ряду внутрішніх координат, має ранг, рівний  $n$ , тобто  $\text{rang} R = n$ , тут  $M^* = (M_1, M_2, \dots, M_n)^T$ .

Розглянемо задачу контурного керування МР, коли необхідно організувати рух робота вздовж заданої траєкторії з заданою траєкторною швидкістю.

Нехай розрахункова траєкторія руху МР на горизонтальній площині задається квадратичними формами від зовнішніх координат  $y_1$  і  $y_2$ :

$$\sum_1 = y^{*T} N_1^1 y^* + N_2^1 y^* + N_3^1 = 0, \quad (4)$$

тут  $y^* = (y_1, y_2)^T$ ;

$$N_1^1 = \begin{vmatrix} a_{11}^1 & 0 \\ 0 & a_{22}^1 \end{vmatrix}; N_2^1 = [a_{31} \quad a_{41}]; N_3^1 = [a_{51}].$$

Сформулюємо вимоги щодо швидкості руху МР вздовж траєкторії (4) в вигляді швидкісного багатovidу

$$\sum_a = \dot{y}^{*T} \dot{y}^* - V_k^2 = 0, \quad (5)$$

де  $V_k$  – контурна швидкість, що визначається завданням.

Швидкість руху МР відносно траєкторії (4) визначається рівністю

$$\sum_2 = zy^{*T} N_1^1 \dot{y}^* + N_2^1 \dot{y}^* = 0. \quad (6)$$

Очевидно, що значення контурної швидкості  $V_k$  має задовольняти умові  $V_k \leq V_{\max}$ , де  $V_{\max}$  – максимальна контурна швидкість, що визначається енергетичними можливостями приводів МР.

Тоді траєкторний  $\Psi_T$  і швидкісний  $\Psi_C$  багатovidи можуть бути сформовані в вигляді вектору

$$\Psi_T = \begin{vmatrix} \Sigma_1 \\ 0 \end{vmatrix} = 0, \quad \Psi_C = \begin{vmatrix} \Sigma_2 \\ \dot{y}^{*T} \dot{y}^* - V_k^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

та відповідно багатovid  $\Psi$ , що відображає вимоги до руху МР в його фазовому просторі, може бути представлений їх лінійною комбінацією в такому векторному вигляді

$$\Psi = \Psi_T + A \Psi_C = \begin{vmatrix} \Sigma_1 \\ 0 \end{vmatrix} + A \begin{vmatrix} zy^{*T} N_1^1 + N_2^1 \\ \dot{y}^{*T} \end{vmatrix} \dot{y}^* + AV = 0, \quad (8)$$

де  $A$  – додатньо визначена матриця постійних коефіцієнтів, що задаються,  $\dim A = (n \times n)$ ;  $0_1$  –  $(1 \times n)$ -вектор нульових коефіцієнтів;

$$V = (0_1 - V_k^2)^T.$$

При збільшенні розмірності простору функціонування МР траєкторний багатovid  $\Psi_T$  доповнюється багатovidом виду (4), що описує додаткові обмеження на траєкторію руху робота, до розмірності  $n-1$ . В якості додаткових багатovidів можуть бути задані обмеження на кути орієнтації робота. Відповідно до (7) буде збільшена і розмірність швидкісного багатovidу  $\Psi_C$ .

Щоб досягти бажаних станів системи, задамо динаміку замкнутої системи у вигляді диференціального рівняння

$$C \Psi_C = \Psi = 0, \quad (9)$$

де  $C$  – додатньо визначена  $(n \times n)$ -матриця постійних коефіцієнтів, що задаються.

Розв'язком рівняння (9) є вираз

$$\Psi = \Psi_0 e^{-t/C}, \quad (10)$$

де  $\Psi_0$  – відхилення від багатovidу (8) в початковий момент часу  $t_0 \in t$ , тут  $t$  – час розв'язання поставленої перед МР задачі, що сформульована багатovidом (8).

Підставивши модель МР (1), (2) і вираз (8) у рівняння (9) і розв'язавши останнє відносно вектору керуючих впливів  $U$ , отримаємо

$$U(z, y) = -[k_1 RB]^{-1} [k_1 (RF + LM^*) + k_2 M^* + k_3]; \quad (11)$$

$$L = \frac{\partial M^*}{\partial y^T}, \quad (12)$$

$$\text{де } k_1 = CA \begin{vmatrix} D_1 \\ zy^{*T} \end{vmatrix}, \quad k_2 = A \begin{vmatrix} D_1 \\ \dot{y}^{*T} \end{vmatrix} + C \begin{vmatrix} D_1 \\ 0_1 \end{vmatrix} + CA \begin{vmatrix} 2\dot{y}^{*T} N_1^1 \\ 0_1 \end{vmatrix};$$

$$k_3 = \begin{vmatrix} \Sigma_1 \\ 0_1 \end{vmatrix} + AV; \quad D_1 = 2y^T N_1^1 + N_1^2, \quad C, \quad A, \quad N_1^1, \quad N_2^1,$$

$N_3^1, V$  – матриці та вектори постійних коефіцієнтів відповідних розмірностей;  $L$  – матриця Якобі моделі (2), що є похідною вектора-стовпця зовнішніх швидкостей по вектору-рядку внутрішніх координат  $y$ .

Алгоритм (11) дозволяє організувати рух МР вздовж бажаних траєкторій, що задаються квадратичними формами зовнішніх координат  $y^*$  з матричними коефіцієнтами  $N_1^1, N_2^1, N_3^1$  з постійною контурною швидкістю  $V_k$ . При цьому величина контурної швидкості  $V_k$  визначається вимогами до продуктивності МР з однієї сторони і енергетичними можливостями приводів МР з іншої.

Розглянемо розв'язання задачі синтезу позиційного регулятора, що забезпечує пересування МР з довільної точки фазового простору зовнішніх координат в задану точку  $y_f^*$  з нульовою кінцевою швидкістю.

Сформулюємо цільові функції, що відповідають поставленій задачі в вигляді наступних рівнянь:

$$y^* = y_f^*, \quad \dot{y}^* = \dot{y}_f^* = 0, \quad (13)$$

де  $y_f^*, \dot{y}_f^*$  –  $(n \times 1)$ -вектори відповідно координати точки позиціонування та значення зовнішньої швидкості в ній.

Відповідно, траєкторні  $\Psi_T$  і швидкісні  $\Psi_C$  багатовиди можуть бути представлені в вигляді:

$$\Psi_T = y^* - y_f^* = 0, \quad \Psi_C = \dot{y}^* = 0, \quad (14)$$

а їх лінійна комбінація

$$\Psi = y^* - y_f^* + A\dot{y}^* = 0, \quad (15)$$

де  $A$  –  $(n \times n)$ -матриця, що має той же сенс, що і в виразі (8) і є лінійним перетином умов (14) в фазовому просторі керованого об'єкта.

Задамо бажану динаміку замкнутої системи у вигляді диференціального рівняння виду (9).

Підставивши модель МР (1), (2) і вирази (14), (15) у рівняння (9) і, розв'язавши останнє відносно вектора керуючих впливів  $U$ , отримаємо

$$U(z, y) = -[CARB]^{-1} [CARF + (C + A + CAL)M^* + y^* - y_f^1], \quad (16)$$

де  $R, L, M^*$  і  $M$  мають той же зміст, що і в (11).

Представлений алгоритм позиційного керування так само, як і алгоритм (11) вимагає відповідної сенсорної підтримки (вимірювання координат  $y$  і  $z$ ) і завдяки розв'язанню (10) гарантує переміщення МР в задану точку простору зовнішніх координат.

Очевидно, що керування (11) і (16) мають загальну структуру, при чому керування (16) є частковим випадком алгоритму (11).

Відзначена загальна структура алгоритмів позиційного (16) і контурного (11) керування дозволяє розробити загальні принципи побудови відповідних систем керування. Крім того, узагальнена структура регулятора дозволяє побудувати ефективні алгоритми позиційно-контурного керування, коли вимагається перемістити МР з довільної точки простору зовнішніх координат в задану точку, вздовж бажаної траєкторії, без введення додаткових вимог до контурної швидкості.

У будь-якій з представлених постановок задач є доцільним формувати траєкторні  $\Psi_T$  і швидкісні  $\Psi_C$  багатовиди у вигляді таких векторів:

$$\Psi_T = |\Sigma_i| = |y^{*T} N_1^i y^* + N_2^i y^* + N_3^i| = 0;$$

$$\Psi_C = \left| \frac{D_j}{D_n + \dot{y}^{*T} M_e} \dot{y}^* + \frac{0_j}{-V_k^2} \right| = 0, \quad (17)$$

$$J_i = \overline{1, n-1}, \dim \Psi_T = \dim \Psi_C = n,$$

де  $n$  – розмірність вектору керувань;  $M_e$  –  $(n \times n)$ -матриця,  $\text{diag} M_e = e$ ;  $D_i$  – допоміжна матриця відповідної розмірності,  $D_i = 2y^T N_1^i + N_2^i$ ;  $i = \overline{1, n}$ .

При розв'язанні задач контурного керування, в загальному випадку,  $N_1^i \neq 0$ ,  $N_2^i \neq 0$ ,  $N_3^i = 0$ ,

$N_1^n = 0$ ,  $N_2^n = 0$ ,  $N_3^n = 0$ ,  $M_e = E$ ,  $V_k \neq 0$ , де  $E$  – одинична матриця відповідної розмірності, і вирази для траєкторних і швидкісних багатовидів, що побудовані на основі рівняння (17), співпадатимуть з представленими у виразі (7).

При розв'язанні задач позиційного керування  $N_1^i = 0$ ,  $N_2^i = E$ ,  $N_3^i = y_f^{*i}$ ,  $M_e = 0$ ,  $V_k = 0$  і вирази для траєкторних і швидкісних багатовидів, що побудовані на основі рівняння (17), співпадатимуть з представленими у виразі (14).

У разі розв'язання позиційно-контурної задачі,  $\Sigma_j$ , може задавати бажану траєкторію руху, а  $\Sigma_n$  – одну з координат точки позиціонування. При цьому  $M_e = 0, V_k = 0$ .

Використовуючи викладені вище процедури формування бажаних багатовидів в просторі зовнішніх координат отримаємо наступний алгоритм позиційно-траєкторного керування

$$U(z, y) = -[k_1 RB]^{-1} [k_1 RF + (k_2 + k_1 L) M^* + k_3], \quad (18)$$

$$\text{де } k_1 = CA \begin{bmatrix} D_j \\ N_2^n + z \dot{y}^{*T} M_e \end{bmatrix}, \quad k_3 = |\Sigma_i| + AV,$$

$$k_2 = (C + A) |D_i| + CA \begin{bmatrix} 2 \dot{y}^{*T} N_1^j \\ 0_1 \end{bmatrix},$$

а індекси  $i, j, n$  мають той же зміст, що і у виразі (17).

При цьому необхідна умова додатньої визначеності матриць  $C$  і  $A$  виконується при  $\text{diag} C = \text{diag} A = s_i > 0$ .

### Висновок

В роботі були запропоновані алгоритми керування, які не вимагають наявності блоку кінематичних перетворень, не потребують наявності апроксимуючих пристроїв і інтерполаторів в структурі системи керування роботом, що дозволяє уникнути відповідних складових похибок завдання, що пов'язані

з наближеністю розрахунків і, отже зменшити похибку відпрацювання спланованих траєкторій руху, тобто підвищити точність руху робота.

Розширення функціональних можливостей полягає в тому, що запропоновані алгоритми залежно від поставленої задачі дозволяють здійснити переміщення робота упродовж заданої траєкторії в задану точку без введення додаткових обмежень щодо траєкторної швидкості.

### Література

1. Каляев А.В. Алгоритм управляющей структуры транспортного робота / А.В. Каляев, В.П. Носков, Ю.В. Чернухин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 4. – С. 64-72.
2. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / Н.М. Амосов и др.; под ред. Н.М. Амосова. – К.: Наукова думка, 1991. – 272 с.
3. Sordalen O.J. Exponential control law for a mobile robot: extension to path following / O.J. Sordalen, C. Canudas de Wit // IEEE Transaction on Robotics and Automation. – 1993. – Vol. 6 (9). – P. 837-842.

Надійшла до редакції 20.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

### АЛГОРИТМ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ВДОЛЬ ЗАДАНОЙ ТРАЕКТОРИИ

*Т.С. Мицай, М.А. Тимофеева*

Проведен аналитический обзор существующих алгоритмов управления автономным мобильным роботом. Выявлено, что все рассмотренные алгоритмы имеют недостатки, связанные с невозможностью организовать движение по широкому спектру траекторий, в результате чего становится невозможным организовать перемещение мобильного робота вдоль заданной траектории. В работе была разработана автоматизированная система управления мобильным роботом, что может передвигаться из одной точки внешней среды в другую по отработанной траектории с заданной траекторной скоростью. Также разработан алгоритм организации движения мобильного робота во внешней среде.

**Ключевые слова:** мобильный робот, планируемая траектория, внешняя среда, модель движения, система управления, целевая функция.

### THE ALGORITHM OF THE MOBILE ROBOT'S MOVEMENT ALONG THE SET TRAJECTORY

*T.S. Mitsai, M.A. Tymofiyeva*

An analytical review of existing algorithms for autonomous mobile robot control is conducted. It is discovered, that all considered algorithms have disadvantages related to impossibility to organize motion on the wide spectrum of trajectories, as a result it is impossible to organize moving of mobile robot along the set trajectory. In this article the automated system of mobile robot's management was developed, that can move from one point of external environment in other on a calculation trajectory with the set trajectory speed. The algorithm of mobile robot's movement is also developed in surrounding space.

**Key words:** mobile robot, planned trajectory, external environment, model of motion, control system, objective function

**Мицай Тетяна Сергіївна** – аспірант факультету інформаційних технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: tanusha\_m\_\_@mail.ru.

**Тимофієва Марина Андріївна** – аспірант факультету інформаційних технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: tma1l@mail.ru.

УДК 629.78.018

И.Б. ТУРКИН, Е.В. СОКОЛОВА, П.А. ЛУЧШЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И АКТУАЛЬНОСТИ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Рассмотрены особенности интерпретации результатов анализа измерительной информации, полученной в процессе функционирования космического аппарата. Реализация сложных программ обработки телеметрии требует специальных методов контроля точности и надежности программной реализации на основе расчетной оценки точности вычисления всех составляющих эту программу операторов и используемых данных. На основе анализа требований к задачам вторичной обработки телеметрии обоснована необходимость использования аффинной интервальной арифметики для учета погрешностей измерения, преобразований и времени получения контролируемой величины.*

**Ключевые слова:** интервальная арифметика, аффинные операции, актуальность информации, достоверность информации, телеметрический контроль, апертурная погрешность.

### Введение

В процессе функционирования космического аппарата (КА) контролируются различные по физической сущности и динамике процессы, происходящие как на самом объекте, так и вне его. Все контролируемые системы КА взаимосвязаны между собой и представлены совокупностью разнородных параметров. Сложность интерпретации результатов анализа измерительной информации возрастает из-за возможных состояний системы, вызванных неисправностями или внешними возмущающими факторами.

Телеметрический контроль осуществляется в режимах непосредственной передачи телеметрических параметров в реальном масштабе времени (при проведении сеансов связи и нахождении КА в зоне видимости наземных средств) или записи телеметрической информации вне зон видимости с последующим воспроизведением информации.

### 1. Цель и задачи исследования

Как показывает практика обработки телеметрической информации (ТМИ) летных испытаний КА, результаты первичной обработки информационноценных параметров содержат как одиночные, так и группирующиеся аномальные погрешности. Использование таких результатов в качестве исходной измерительной информации для автоматизированной системы поддержки принятия решений в реальном масштабе времени приводит к ошибочным заключениям о контролируемых событиях [1].

Бортовые информационно-измерительные системы сегодня – это специализированные вычислители, средства сопряжения с объектом контроля и управления, вычислительная сеть, точность и качество которых зависит во многом от внешних по отношению к ИИС сигналов и помех, к которым в процессе обработки в каналах системы добавляются внутренние погрешности и сбои [2]. Распределенная архитектура бортовых систем сбора информации требует учета апертурных погрешностей, то есть погрешностей обусловленных несинхронностью измерений различных параметров, выполненных автономными измерителями.

Реализация сложных программ обработки ТМИ требует специальных методов контроля точности и надежности программной реализации на основе расчетной оценки точности вычисления всех составляющих эту программу операторов и используемых данных [3]. Метрологическая аттестация, как «исследование точностных свойств алгоритма в рамках конкретной измерительной задачи или методики выполнения измерений с целью оценивания характеристик составляющих погрешностей получаемых результатов измерений» [4], проводится для наилучших (с точки зрения искомых характеристик алгоритма или программы) вариантов сочетания моделей полезных сигналов и моделей погрешностей исходных данных. Использование наиболее неблагоприятных вариантов дает гарантированную, но завышенную оценку итоговой погрешности, поэтому создание адаптивных алгоритмов, самостоятельно контролирующих в процессе вычислений точность результата, представляет собой актуальную задачу.

Возможность выполнения доказательных (достоверных, надёжных) вычислений на ЭВМ с гарантированной точностью, когда неопределённость и неоднозначность информации возникает с момента ее получения, является одним из преимуществ методов интервального анализа [5]. В этом случае результат каждого измерения можно рассматривать как интервальную величину с центром, соответствующим показаниям датчика, и шириной интервала, определяемой классом точности датчика. Интервальная модель данных является основой методов обработки информации, обеспечивающих контроль актуальности и достоверности информации. Под актуальностью будем понимать свойство информации в указанный (по умолчанию - текущий) момент времени адекватно отображать состояние объектов предметной области, под достоверностью - соответствие информации реальной действительности. Обеспечение актуальности на этапе обработки ТМИ – это синхронизация информации, полученной от многих автономных вычислительных устройств, объединенных в удаленную бортовую сеть, и приведение этой информации к единой требуемой отметке времени. Обеспечение достоверности – это подтверждение на основе представления объективных доказательств возможности использования результатов обработки ТМИ.

**Целью работы** является обоснование возможности и целесообразности применения в задачах обработки ТМИ методов аффинно-интервального анализа.

## 2. Результаты исследований

**Определение. Объект данных** (ОД) – это формализованное представление измеренной или вычисленной величины с учетом погрешностей измерения и преобразований, а также времени, когда эта величина получена:

$$\text{Data}_i = \langle V_i, T, k \rangle, \quad (1)$$

где  $V_i = [\underline{V}_i, \overline{V}_i] = \{V_i \in \mathbb{R} \mid \underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i\}$  – интервальное значение  $i$ -го объекта данных в некоторый интервал времени  $T = \{t \in \mathbb{R} \mid \underline{t} \leq t \leq \overline{t} \mid t > 0\}$  от момента формирования запроса до момента получения ответа;  $k \in \mathbb{R}$  – динамическая характеристика для описания максимальной скорости изменения объекта данных.

### 2.1. Правила выполнения операций над ОД

Результатом арифметической операции  $\otimes \in \{+, -, \cdot, /\}$  над ОД  $A$  и  $B$  с совпадающими интервалами времени  $T_A = T_B = T_0$  будет ОД  $C$ :

$$\begin{aligned} C &= A \otimes B = \\ &= \left\langle \left[ \min \left( \frac{\underline{V}_A \otimes \underline{V}_B, \overline{V}_A \otimes \underline{V}_B}{\underline{V}_A \otimes \overline{V}_B, \overline{V}_A \otimes \overline{V}_B} \right), \right. \right. \\ &\quad \left. \max \left( \frac{\underline{V}_A \otimes \underline{V}_B, \overline{V}_A \otimes \underline{V}_B}{\underline{V}_A \otimes \overline{V}_B, \overline{V}_A \otimes \overline{V}_B} \right) \right], T_0, k_C \right\rangle, \quad (2) \\ k_C &= \begin{cases} k_A + k_B, \otimes \in \{+, -\}, \\ k_A \overline{V}_B + k_B \overline{V}_A, \otimes = \cdot, \frac{(k_A \overline{V}_B + k_B \overline{V}_A)}{\min(|\underline{V}_B|, |\overline{V}_B|)^2}. \end{cases} \end{aligned}$$

Результат операции деления при  $\underline{V}_B \leq 0 \leq \overline{V}_B$  неопределен.

Для автоматической оценки влияния несинхронности получения данных на достоверность результата операции в модель введены три операции.

1. Приведение ОД к моменту времени  $\tau$ . Результатом приведения ОД  $A = \langle V_A, t, k_A \rangle$  к моменту времени  $\tau$  будем называть ОД  $A_\tau = \langle V_{A_\tau}, \tau, k_A \rangle$ , где

$$\underline{\tau} = \tau = \overline{\tau}, \quad \overline{V_{A_\tau}} = \overline{V}_A + k_A \cdot \max(\tau - \underline{t}, \overline{t} - \tau);$$

$$\underline{V_{A_\tau}} = \underline{V}_A - k_A \cdot \max(\tau - \underline{t}, \overline{t} - \tau).$$

2. Приведения ОД к расширенному временному интервалу. Под расширенным временным интервалом для ОД  $A = \langle V_A, t, k_A \rangle$  будем понимать некоторый интервал времени  $t_e$  такой, что  $\underline{t}_e \leq \underline{t}, \overline{t} \leq \overline{t}_e$ . Тогда результатом приведения ОД  $A = \langle V_A, t, k_A \rangle$  к временному интервалу  $t_e$  будем называть ОД  $A_e = \langle V_{A_e}, t_e, k_A \rangle$ , где

$$\overline{V_{A_e}} = \overline{V}_A + k_A \cdot \max(\overline{t}_e - \underline{t}, \overline{t} - \underline{t}_e);$$

$$\underline{V_{A_e}} = \underline{V}_A - k_A \cdot \max(\overline{t}_e - \underline{t}, \overline{t} - \underline{t}_e).$$

3. Интерполяция ОД к моменту времени  $\tau$ . Результатом интерполяции ОД  $A = \langle V, t, k_A \rangle$  к моменту времени  $\tau$  при известных значениях  $A_i, A_{i+1}$ , таких, что:  $\underline{t}_i < \tau < \overline{t}_{i+1}$  будем называть ОД  $A|_\tau = \langle V_A, t, k_A \rangle$ , где

$$\overline{V_A}|_\tau = \min(\overline{V_{A_i}} + k_A(\tau - \underline{t}_i), \overline{V_{A_{i+1}}} + k_A(\overline{t}_{i+1} - \tau));$$

$$\underline{V_A}|_\tau = \max(\underline{V_{A_i}} - k_A(\tau - \underline{t}_i), \underline{V_{A_{i+1}}} - k_A(\overline{t}_{i+1} - \tau)).$$

### 2.2. Учет взаимозависимости ОД

Аффинная математика [6] позволяет получать более точные оценки областей значений, чем интер-

вальное исчисление, на основе учета взаимной зависимости между величинами, возникающей в процессе вычислений. Особенно сильно это проявляется в длинных вычислительных цепочках, когда результаты одних операций становятся входными для других.

Интервальное значение  $V_i$   $i$ -того ОД представим аффинной формой  $\hat{V}_i$ , т.е. полиномом первой степени:  $\hat{V}_i = V_{0i} + \sum_{k=1}^n V_{ki} \varepsilon_k$ , где  $V_{ki} \in \mathbb{R}$ , а  $\varepsilon_k \in [-1, 1]$ . Число  $V_{0i}$  называют центром аффинной формы  $\hat{V}_i$ , коэффициенты  $V_{ki}$  — частичными отклонениями, а  $\varepsilon_k$  — символами шума. Аффинная форма представляет собой интервал, отражающий значение  $V$ , т.е.  $V = [V_0 - r, V_0 + r]$ , где  $r$  суммарное отклонение из  $\hat{V}$ ,  $\sum_{k=1}^n |V_{ki}|$ . В тоже время, любое интервальное значение  $V = [\underline{V}, \bar{V}]$  можно представить аффинной формой  $\hat{V} = V_0 + \sum_{k=1}^n V_k \varepsilon_k$ , где  $V_0 = (\underline{V} + \bar{V})/2$ ,  $V_k = (\bar{V} - \underline{V})/2$  и  $\varepsilon_k$  — новый символ шума, не встречающийся в любой другой существующей аффинной форме.

Главная особенность аффинной арифметики состоит в том, что с помощью одного и того же  $\varepsilon_k$  можно отразить неопределенность нескольких измерений. Например, предположим что значения  $V_1$  и  $V_2$  представлены аффинными формами

$$\begin{aligned}\hat{V}_1 &= 20 - 4\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 + 3\varepsilon_4; \\ \hat{V}_2 &= 10 - 2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_4.\end{aligned}$$

Тогда,  $V_1 = [11, 29]$  и  $V_2 = [6, 14]$ , т.е. пара  $(V_1, V_2)$  лежит в прямоугольнике (рис. 1). Однако, учитывая зависимость, пара  $(\hat{V}_1, \hat{V}_2)$  лежит в выпуклом многоугольнике симметричном относительно центра  $(V_{01}, V_{02})$ , полученном в результате перебора всех значений шумов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_4$  из интервала  $[-1, 1]$ .

При проведении вычислений с учетом взаимозависимости ОД каждая элементарная операция над действительными значениями  $z \leftarrow f(x, y)$  заменяется соответствующей процедурой  $\hat{z} \leftarrow f(\hat{x}, \hat{y})$  над аффинными формами, результатом которой тоже является аффинная форма.

Вычисление  $\hat{x} - \hat{x}$  даст точный ноль, тождества подобные  $(\hat{x} + \hat{y}) - \hat{x} = \hat{y}$  недействительные в ин-

тервальной арифметике, работают в аффинной (за исключением ошибок округления и переполнения).

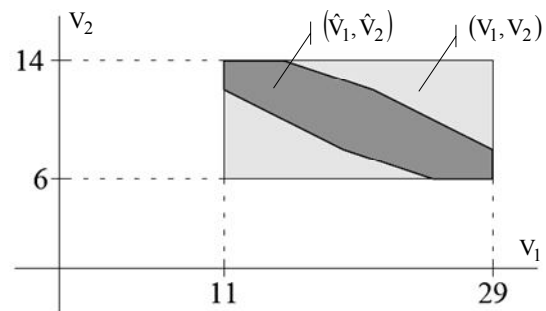


Рис. 1. Пример объединения двух частично зависимых аффинных форм

Если сама операция  $f$  является неаффинной  $z \leftarrow f(x, y)$  функцией, то наиболее точный результат будет получен, если представить  $z$  в виде суммы аффинной комбинации шумов и дополнительного термина  $z_k \varepsilon_k$ , представляющего ошибку аппроксимации:

$$\begin{aligned}\hat{z} &= f^*(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) + z_k \varepsilon_k = \\ &= z_0 + z_1 \varepsilon_1 + \dots + z_n \varepsilon_n + z_k \varepsilon_k.\end{aligned}\quad (3)$$

$\varepsilon_k$  должен отличаться от других шумов участвующих в этом же вычислении и коэффициент  $z_k$  должен быть верхним пределом абсолютной величины ошибки аппроксимации  $f^e$ , т.е.  $|z_k| \geq \max \left\{ \left| f^*(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) - f^a(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \right| : \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n \in U \right\}$ , остаточный коэффициент  $z_k$  должен также учитывать какие-либо ошибки округления, полученные при вычислениях других коэффициентов  $z_0, \dots, z_n$ . Замена  $z_k \varepsilon_k$  в  $f^e(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  в (3) приведет к потере информации: шум  $\varepsilon_k$  фактически является функцией от  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ , но это не учитывается, таким образом, в последующих вычислениях  $\varepsilon_k$  будет рассмотрен как независимый. Поэтому,  $|z_k|$  учитывает потерю информации, т.е. ошибку аппроксимации при операции  $\hat{z} \leftarrow f(\hat{x}, \hat{y})$ .

**Пример.** Рассмотрим умножение двух аффинных форм,  $\hat{z} \leftarrow \hat{x} \hat{y}$ , где  $\hat{x} = 30 - 4\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$  и  $\hat{y} = 20 + 3\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ . Операнды частично коррелируют через  $\varepsilon_1$ . Сгруппируем термы произведения в аффинную часть  $A$  и квадратичный остаток  $Q$ , где

$$A(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = 600 + 10\varepsilon_1 + 40\varepsilon_2 + 30\varepsilon_3;$$

$$Q(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = (-4\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)(3\varepsilon_1 + \varepsilon_3).$$

Оценка диапазона  $Q$  даст интервал  $\bar{Q} = [-24, 24]$ , следовательно, аффинная форма

$\hat{z} = 600 + 10\varepsilon_1 + 40\varepsilon_2 + 30\varepsilon_3 + 24\varepsilon_4$  доказывает, что  $z$  лежит в диапазоне  $600 \pm 104 = [496, 704]$ . Фактическим диапазоном  $\hat{x}\hat{y}$  будет  $[528, 675]$ , поэтому диапазон, полученный с помощью аффинной арифметики, только в 1,42 раза шире, чем точный. Для сравнения, диапазон, полученный по правилам интервальной арифметики, в 3,26 раза шире. Большое несоответствие получается из-за отрицательной корреляции между  $x$  и  $y$ , отмеченной шумом  $\varepsilon_1$ . Корреляционные члены  $-80\varepsilon_1$  и  $90\varepsilon_1$  почти уравниваются в аффинной арифметике, но добавляются в интервальной.

### 2.3. Обработка ошибки округления

Для учета ошибки округления необходимо расширить результирующую формулу  $\hat{z}$  дополнительным термом  $z_k \varepsilon_k$ , где  $z_k$  верхняя граница суммы всех абсолютных ошибок  $d_i$ , внесенных вычислением коэффициентов  $z_i$  и  $\varepsilon_i$ , являющаяся шумом не входящим в другие аффинные формы.

**Пример.** В работе [8] рассмотрена задача нахождения последовательности:  $I_n = \frac{1}{e} \int_0^1 x^n e^x dx$ , для

которой справедливо:  $I_0 = 1 - e^{-1}$ , а после интегрирования по частям для  $n > 0$  доказывается рекуррентное равенство:  $I_n = 1 - n \cdot I_{n-1}$ . Очевидно, что

$\forall n, 0 < I_n \leq \frac{1}{n+1}$ . Из-за накопления ошибок округления прямая расчетная схема является неустойчивой, так как расчетная ошибка, внесенная при определении  $I_0$ , возрастает пропорционально  $n!$ . При увеличении точности расчета  $I_0$  растет максимальная величина  $n$ , при которой погрешность расчета остается допустимой, но сам процесс на определенном этапе всё равно теряет устойчивость (рис. 2)

Точное значение на рис. 2 получено из обратной рекуррентной схемы:  $I_{30} = 0, I_{n-1} = \frac{1 - I_n}{n}$ . С применением правил аффинных операций, предполагая, что производится округление до 12 цифр, для вычислений в прямом направлении получим оценку шума  $\varepsilon_n$  для каждого  $I_n$ :  $\varepsilon_0 = 0,5 \cdot 10^{-12}$ ,  $\varepsilon_n = n \cdot \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_0$ , а при вычислениях в обратном:  $\varepsilon_{30} = \frac{1}{30+1}$ ,  $\varepsilon_{n-1} = \frac{\varepsilon_n}{n} + 0,5 \cdot 10^{-12}$  (рис. 3).

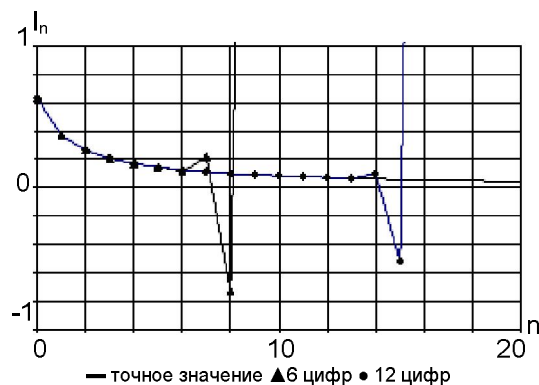


Рис. 2. Зависимость  $I_n$  от  $n$  и количества учитываемых цифр при расчете  $I_0$

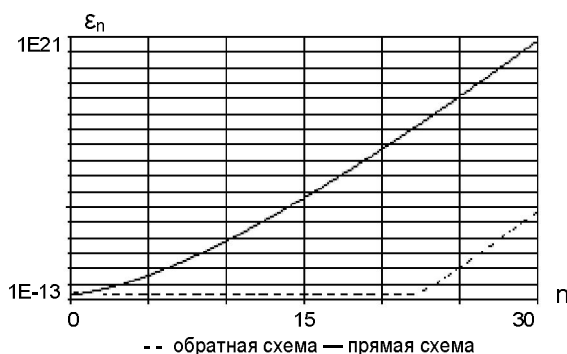


Рис. 3. Зависимость шума от  $n$  для прямой и обратной схемы расчета

Расчетная зависимость шума для прямой и обратной схемы расчета доказывает необходимость контроля корректности даже простейших алгоритмов, и возможность выполнения такого контроля с помощью аффинных преобразований.

## Выводы

В настоящее время состав телеметрируемых параметров, необходимый для оценивания функционирования КА, значительно расширился. Этому способствуют разработка новых КА и электронно-вычислительных средств, расширение круга решаемых задач и развитие современных информационных технологий, которые позволяют проводить обработку полного потока ТМИ в реальном масштабе времени. Разрабатываемые интеллектуальные информационные технологии предъявляют высокие требования к исходной измерительной информации прежде всего из-за ограниченности времени, отводимого на решение задачи. Применение методов интервальной математики решает важную задачу обеспечения актуальности и достоверности результатов обработки ТМИ.

## Литература

1. Эволюция и тенденции развития комплексов управления КА за рубежом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nash-cosmos.ru/sredstva-vuvedenija/39-kompleksu-upravleniy/73-kurazvitiie.html>.
2. Совершенствование телеметрических систем на основе рекомендаций Комитета CCSDS [Электронный ресурс] / А.В. Кантор, А.В. Невзоров, А.Е. Шириаков, О.С. Шмонов // Автоматические космические аппараты для планетных и астрофизических исследований. Проектирование, конструкция, испытания и расчет: материалы XXXIII Академических чтений по космонавтике, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 26-29 янв. 2009. – Режим доступа: <http://www.ihst.ru/~akm/34t18.htm>.
3. PACKET TELEMETRY recommendation for space data system standards [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://public.ccsds.org/publications/archive/102x0b5s.pdf>.
4. Каргин В.А. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном масштабе времени. / В.А. Каргин, Н.В. Нездоровин, Д.А. Николаев // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 77-82.
5. Жукова Н.А. Методы и модели оперативно-го контроля состояния сложных динамических объектов на основе измерительной информации с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Жукова Наталья Александровна; С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т. – СПб., 2008. – 19 с.
6. Stolfi J. Self-validated numerical methods and applications / J. Stolfi, L. H. de Figueiredo // Brazilian Mathematics Colloquium monograph, IMPA. – Rio de Janeiro, Brazil, 1997. – 116 p.
7. Половинкин Е. С, Балашов М. В. Элементы выпуклого и сильно выпуклого анализа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
8. Бабушка И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений / И. Бабушка, Э. Витасек, М. Прагер. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой И.В. Чумаченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ИНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВІРОГІДНОСТІ Й АКТУАЛЬНОСТІ ТЕЛЕМЕТРІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

*І.Б. Туркін, Є.В. Соколова, П.О. Лучшев*

Розглянуто особливості інтерпретації результатів аналізу вимірювальної інформації, отриманої у процесі функціонування космічного апарату. Реалізація складних програм обробки телеметрії вимагає спеціальних методів контролю точності і надійності програмної реалізації на основі розрахункової оцінки точності обчислення всіх складових цю програму операторів і використовуваних даних. На основі аналізу вимог до завдань вторинної обробки телеметрії обґрунтована необхідність використання афінної інтервальної арифметики для обліку похибок вимірювання, перетворень і часу отримання контрольованої величини.

**Ключові слова:** інтервальна арифметика, афінні операції, актуальність інформації, вірогідність інформації, телеметричний контроль, апертурна погрішність.

## INTERVAL MODELS IN THE AUTOMATIC CONTROL RELIABILITY PROBLEMS AND TELEMETRY SPACE VEHICLES URGENCY

*I.B. Turkin, E.V. Sokolova, P.A. Luchev*

The features of the measurement data the results interpreting obtained in the spacecraft operation. The implementation of complex programs for processing telemetry requires special control of accuracy and reliability software methods implementation based on the estimated accuracy estimates calculate all components of this program operators and data used. Based on the analysis of requirements for the secondary processing telemetry tasks the necessity to use the affine interval arithmetic to account for measurement errors, changes and time of the controlled variable receipt.

**Key words:** interval arithmetics, affine operations, information urgency, reliability information, telemetering control, aperture error.

**Туркин Игорь Борисович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [energy@d4.khai.edu](mailto:energy@d4.khai.edu), [nikrutrogi@mail.ru](mailto:nikrutrogi@mail.ru).

**Соколова Евгения Витальевна** – ст. преп. кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [EVSkhai@gmail.com](mailto:EVSkhai@gmail.com), [Sev\\_ai@mail.ru](mailto:Sev_ai@mail.ru).

**Лучшев Павел Александрович** – к.т.н., доц. каф. кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: [lpa@ai.kharkov.com](mailto:lpa@ai.kharkov.com).

УДК 004.78

И.В. ШОСТАК, М.А. ДАНОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ СТРАТЕГИИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ**

*Рассмотрены существующие методологии разработки программных проектов, а также приведены сравнительные характеристики наиболее эффективных и часто применяемых методологий, таких как RUP, MSF, XP, Crystal и других. Приведена классификация типов программных проектов по масштабу, надежности, влиянию на безопасность и многих других. Предложен подход к формированию стратегии применения методологий разработки программного обеспечения для различных типов программных проектов, который позволяет установить однозначное соответствие между конкретными типами программных проектов и рассматриваемыми методологиями.*

**Ключевые слова:** методология разработки ПП, прикладные программы, программный проект, классификация ПО, стратегия, масштаб проекта.

**Введение**

На сегодняшний день, как во всем мире, так и в Украине спрос на программное обеспечение (ПО) постоянно увеличивается. Как средство автоматизации и улучшения работ, оно используется практически во всех сферах человеческой деятельности (экономика, медицина, бизнес, коммерция, промышленность и т. д.).

Разработчики ПО ориентированы на реализацию разных предметных областей, начиная от операционных систем и заканчивая прикладными бизнес-системами [1, 7, 11]. Знания, используемые ими, как правило, отличаются разнообразием и являются неполными, несогласованными и разнородными. Зачастую общий проект представляет собой смесь краткосрочных решений, при этом единого плана не существует, то есть разработка ПО представляет собой деятельность, которую возможно охарактеризовать фразой "code and fix" (кодирования и исправления ошибок).

Описанная выше ситуация как правило возникает при создании небольшой программы, однако при разработке крупного ПО количество ошибок будет неизбежно расти, а исправлять их будет все труднее [3, 4]. При подобной организации тестирования и исправления ошибок адекватное планирование просто невозможно, и, как следствие, нарушение планов по созданию программы.

Как известно [1, 2, 4, 11], главной целью процесса проектирования и разработки ПО является создание программного продукта, обладающего высоким качеством, в приемлемые сроки в рамках прогнозируемого бюджета. Достичь этого можно толь-

ко при правильной организации работ по созданию ПО, применяя различные методологии.

Любая методология организует взаимодействие всех вовлеченных в проект сторон в единый процесс с целью снижения риска получения результата (продукта), не удовлетворяющего поставленным требованиям [2, 5].

Методология превращает создание программного продукта в упорядоченный процесс [8 – 12], с помощью которого можно сделать работу программиста более прогнозируемой и эффективной.

На сегодняшний день задачи управления процессом разработки ПО относятся к классу слабоформализованных, слабоструктурированных задач с расплывчатыми ограничениями, неполными и нечеткими данными, сильно зависящими от изменений внешней среды и субъективных предпочтений лица, принимающего решение [2, 5 – 8] таким образом *цель данной статьи состоит в изложении подхода к применению методологий разработки для различных типов программных проектов.*

**1. Постановка задачи**

Известен портфель программных проектов, разрабатываемых в типовой ИТ-Компании, а также набор методологий разработки ПО.

Необходимо получить рациональную стратегию применения методологий для различных типов программных проектов.

Решение указанной задачи предполагает разработку классификации типов программных проектов, а также проведение сравнительного анализа особенностей наиболее часто применяемых методологий

проектирования. Реализация последней задачи послужит основанием к созданию классификации методологий разработки ПО. При этом будет установлено однозначное соответствие между конкретными типами программных проектов и рассматриваемыми методологиями. На заключительном этапе решения рассматриваемой задачи путем композиции этапов различных методологий будет создана эффективная процедура, формализующая стратегию разработки ПО.

## 2. Обзор существующих методологий разработки ПО

Рассмотрим наиболее известные и эффективные методологии разработки ПО.

**Rational Unified Process (RUP)** – методология разработки программного обеспечения, созданная компанией Rational Software.

RUP обеспечивает строгий подход к распределению задач и ответственности внутри организации-разработчика. Его предназначение заключается в том, чтобы гарантировать создание точно в срок и в рамках установленного бюджета качественного ПО, отвечающего нуждам конечных пользователей.

Особенностью RUP является то, что в результате работы над проектом создаются и совершенствуются модели. RUP опирается на разработку и развитие семантически обогащенных моделей, всесторонне представляющих разрабатываемую систему. В качестве языка моделирования в общей базе знаний используется Unified Modeling Language (UML), являющийся международным стандартом. Стандартный язык моделирования, используемый всеми членами группы, делает понятными для всех описания требований, проектирование и архитектуру системы.

RUP использует итеративную модель разработки. В конце каждой итерации проектная команда должна достичь запланированных на данную итерацию целей, создать или доработать проектные артефакты и получить промежуточную, но функциональную версию конечного продукта. Итеративная разработка позволяет быстро реагировать на меняющиеся требования, обнаруживать и устранять риски на ранних стадиях проекта, а также эффективно контролировать качество создаваемого продукта.

Структуру жизненного цикла проекта, выполняемого по технологии RUP [5] удобно рассматривать на координатной плоскости (рис.1).

### Рабочие процессы

### Стадии

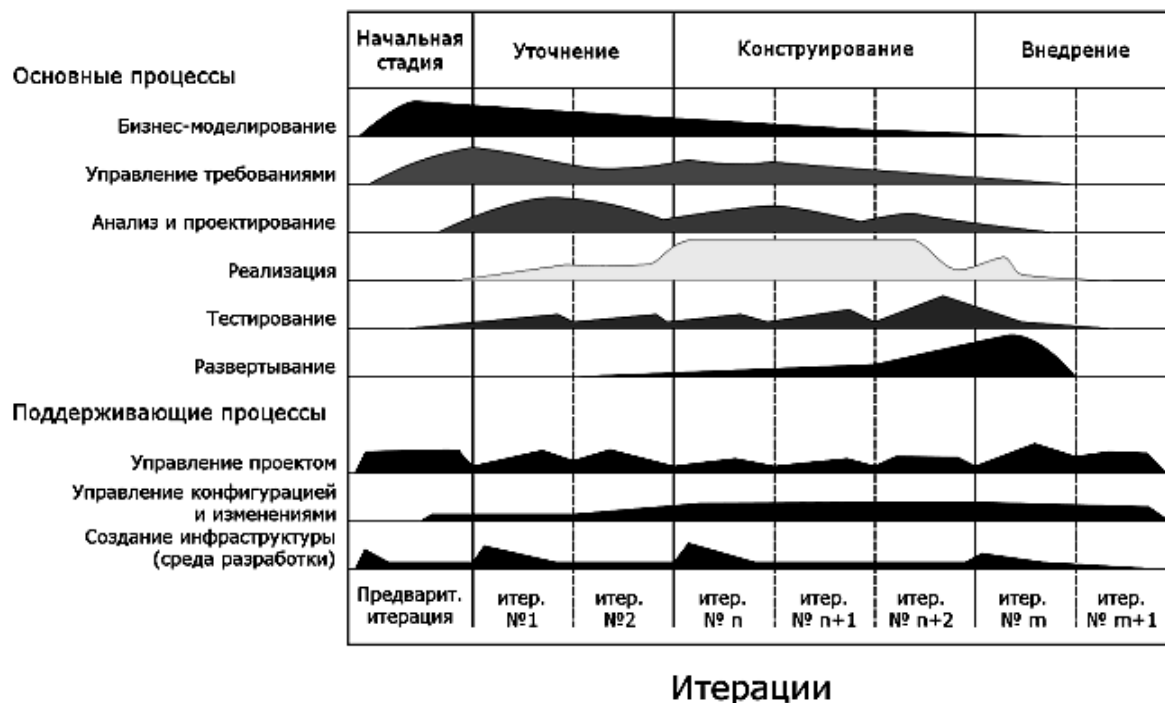


Рис. 1. Модель жизненного цикла RUP

Горизонтальное измерение представляет собой динамическую структуру или временное измерение процесса. Оно показывает, как процесс, выраженный в форме циклов, фаз, итераций и вех, разверты-

вается в ходе жизненного цикла проекта.

Вертикальное измерение представляет собой статическую структуру процесса. Оно описывает, как элементы процесса – задачи, дисциплины, арте-

факты и роли – логически группируются в дисциплины или рабочие процессы (workflows).

Полный жизненный цикл разработки продукта состоит из четырех фаз, каждая из которых включает в себя одну или несколько итераций, причем переход с фазы на фазу возможен только после выполнения задач фазы и представляет собой контрольную точку (milestone) процесса:

1) начало (Inception) – основное внимание уделяется моделированию бизнес процессов и работе с требованиями. В этой фазе, как правило, осуществляется проектирование и реализация первого прототипа системы;

2) проектирование (Elaboration) – тщательно прорабатываются требования и выбираются основные проектные решения. В этой фазе концептуальный прототип превращается в реальную систему, позволяющую протестировать и оценить выбранные архитектурные решения;

3) построение (Construction) – быстрая и экономичная разработка кода системы. К концу фазы система должна быть готова к передаче заказчику для приемо-сдаточных испытаний.

4) внедрение (Transition) – посвящена подготовке разработанного продукта к передаче его заказчику, обучению пользователей, а также определению качества продукта.

RUP пригоден как для маленьких групп разработчиков, так и для больших организаций, занимающихся созданием ПО, т.к. в основе RUP лежит простая и понятная архитектура процесса, которая обеспечивает общность для целого семейства процессов.

**Методология Microsoft Solutions Framework (MSF)** – это методология ведения проектов и разработки решений, базирующаяся на принципах работы над продуктами самой фирмы Microsoft и предназначенная для использования в организациях, нуждающихся в концептуальной схеме для построения современных решений. MSF представляет собой согласованный набор концепций, моделей и правил.

MSF состоит из двух моделей:

- модель проектной группы;
- модель процессов, и трех дисциплин:
- управление проектами;
- управление рисками;
- управление подготовкой.

В MSF нет роли "менеджер проекта" и иерархии руководства, управление разработкой распределено между руководителями отдельных проектных групп внутри коллектива, выполняющих следующие задачи (ролевые кластеры):

- управление программой (program manager) –

разработка архитектуры решения, административные службы;

- разработку (developer) – разработка приложений и инфраструктуры, технологические консультации;

- тестирование (QAE) – планирование, разработка тестов и отчетность по тестам;

- управление выпуском (release manager) – инфраструктура, сопровождение, бизнес-процессы, выпуск готового продукта;

- удовлетворение заказчика (user experience) – обучение, эргономика, графический дизайн, техническая поддержка;

- управление продуктом (product manager) – бизнес-приоритеты, маркетинг, представительство интересов заказчика.

Жизненный цикл процессов в MSF сочетает водопадную и спиральную модели разработки: проект реализуется поэтапно, с наличием соответствующих контрольных точек, а сама последовательность этапов может повторяться по спирали.

При управлении проектом четко ставится цель, которую необходимо достичь в результате, и учитываются ограничения (ресурсов, времени и возможностей), накладываемые на проект. Эти три вида ограничений и приоритетность задач по их преодолению образуют треугольник приоритетов в MSF.

**Методология eXtreme Programming (XP)** – одна из гибких методологий разработки программного обеспечения, которая представляет собой небольшой набор конкретных правил, позволяющих максимально эффективно выполнять требования современной теории управления программными проектами.

XP ориентирована на:

- командную работу с тесными связями внутри команды и с заказчиком;

- разработку наиболее простых работающих решений;

- гибкое адаптивное планирование;

- оперативную обратную связь (путем модульного и функционального тестирования).

Основными принципами XP является разработка небольшими итерациями на основании порции требований заказчика (т.н. пользовательских историй), написание функциональных тестов до написания программного кода, постоянное общение и постоянный рефакторинг кода.

Обычно XP характеризуют набором из 12 правил (практик) [8], которые необходимо выполнять для достижения хорошего результата. Ни одна из практик не является принципиально новой, но в XP они собраны вместе и их можно объединить в 4 группы:

1) короткий цикл обратной связи (разработка через тестирование, игра в планирование, заказчик всегда рядом, парное программирование);

2) непрерывный, а не пакетный процесс (непрерывная интеграция, рефакторинг, частые небольшие релизы);

3) понимание, разделяемое всеми (простота, метафора системы, коллективное владение кодом/шаблонами проектирования, стандарт кодирования);

4) социальная защищенность программиста (40-часовая рабочая неделя).

**Методология SCRUM** – устанавливает правила управления процессом разработки и позволяет использовать уже существующие практики кодирования, корректируя требования или внося тактические изменения. Использование этой методологии дает возможность выявлять и устранять отклонения от желаемого результата на более ранних этапах разработки программного продукта.

Основа Scrum – итеративная разработка. Весь проект делится на итерации (спринты) продолжительностью 30 дней каждый. Методология, предназначенная для небольших команд (до 10 человек). Выбирается список функций системы, которые планируется реализовать в течение следующего спринта. Самые важные условия – неизменность выбранных функций во время выполнения одной итерации и строгое соблюдение сроков выпуска очередного релиза, даже если к его выпуску не удастся реализовать весь запланированный функционал. Руководитель разработки проводит ежедневные 20 минутные совещания, которые так и называют – scrum, результатом которых является определение какие функции системы были реализованы за предыдущий день, с какими сложностями столкнулись и что планирует сделать за следующий день.

Методология позволяет команде выбрать задачи, которые должны быть выполнены, учитывая бизнес-приоритеты и технические возможности, а также решить, как их эффективно реализовать. Это позволяет создать условия, при которых команда работает с удовольствием и максимально продуктивно. Основной упор методология Scrum делает на управление проектами и не задает никаких технических практик.

**Методология Crystal Clear** – методология, позволяющая менять степень формализации процесса разработки в зависимости от критичности задач и количества участников разработки.

Основные особенности: итеративная инкрементная разработка, автоматическое регрессионное тестирование, пользователи привлекаются к активному участию в проекте, состав документации определяется участниками проекта, как правило, используются

средства контроля версий кода. Ориентирована на поддержание естественных привычек разработчиков.

Помимо Crystal Clear в семейство Crystal входит еще несколько методологий, предназначенных для выполнения более крупных или более критических проектов. Они отличаются несколько более жесткими требованиями к объему документации и вспомогательным процедурам, таким как управление изменениями и версиями.

**Методология разработки динамических систем (DSDM)** – позволяет разрабатывать проект в короткие сроки с использованием ограниченного количества ресурсов, предусмотренного бюджетом.

DSDM стремится сократить связующие звенья между заказчиком и разработчиком, аналитиком и дизайнером, между членами команды и между разными уровнями управления, чтобы обеспечить более эффективный процесс разработки программного обеспечения. Фиксируя время разработки и устанавливая ограничения на используемые ресурсы, намного проще создать процесс разработки, отвечающий требованиям заказчиков.

Основные принципы DSDM:

– Активное вмешательство пользователя (в идеале, пользователи и разработчики разделяют рабочее пространство, поэтому решения могут приниматься на месте).

– Команда должна иметь возможность принимать решения без ожидания подтверждения вышестоящими уровнями (команда состоит как из разработчиков, так и из заказчиков).

– Требования заказчика – прежде всего.

– Все изменения обратимы (возвращение – основная черта DSDM).

Тестирование происходит на протяжении всего жизненного цикла разработки, а не перед самым выпуском, когда что либо изменить без больших затрат уже невозможно (тестирование проводится как разработчиками, так и пользователями). Сроки должны быть сжатыми и определяющими скорый выпуск продукта.

Оценка программы должна быть основана на требуемой функциональности, а не на строчках кода.

Оценка риска должна фокусироваться на функциях, которые должны быть получены, а не на процессе их построения.

**Методология Feature Driven Development (FDD)** – функционально-ориентированная разработка, оперирует понятием функции или свойства (feature). Разработка состоит из 5 основных этапов:

1) разработка общей модели,

2) составление списка необходимых функций системы,

- 3) планирование работы над каждой функцией,
- 4) проектирование функций,
- 5) конструирование функций.

Разработчики в FDD делятся на «хозяев классов» и «главных программистов».

Главные программисты привлекают хозяев задействованных классов к работе над очередным свойством.

Работа над проектом происходит итеративно, частый выпуск версий, каждая из которых реализует определенный набор функций.

**Методология адаптивной разработки (ASD)** – появилась как альтернатива традиционным ориентированным на процесс, методам управления разработкой ПО. Главную роль играют человеческий фактор, результаты работы и минимизация самого процесса при максимально увеличении взаимодействия между людьми.

ASD базируется на принципе непрерывной адаптации, благодаря которой возникает другой жизненный цикл проекта. Постоянные изменения в проекте становятся нормой.

В ASD обычный статический жизненный цикл "Планирование – Проектирование – Конструирова-

ние" заменен на динамический "Обдумывание – Взаимодействие – Обучение". Этот цикл ставит своей целью непрерывное обучение. Он связан с постоянными изменениями, повторными оценками попытками предугадать неизвестное на текущий момент будущее проекта и требует тесного взаимодействия между разработчиками, тестировщиками и заказчиками.

Методология ASD построена на концептуальной базе теории сложных адаптивных систем. Она рассчитана на использование в экстремальных проектах, в которых преобладают быстрый темп работ, непредсказуемость и частые изменения. Есть проекты, которые не могут считаться экстремальными, однако для всех остальных ASD подходит гораздо лучше, чем любой традиционный подход к разработке ПО.

Опираясь на вышеприведенное описание методологий, составим таблицу их сравнительных характеристик (табл.1).

Под уровнем *формализма* будем понимать наличие стандартов и правил оформления, детализации и движения сопутствующей документации в процессе разработки ПО.

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных методологий разработки ПО

|                            | <b>RUP</b>                                    | <b>«Гибкие»<br/>(XP, SCRUM, Crystal,<br/>DSDM, FDD, ASD)</b> | <b>MSF</b>                 |
|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Основные принципы</b>   | Ориентация на процесс, детальное планирование | Ориентация на человека, переоценка и постоянное планирование | Совмещает RUP и «Гибкие»   |
| <b>Модель ЖЦ</b>           | Итеративная                                   | Итеративная                                                  | Каскадная + спиральная     |
| <b>Уровень формализма</b>  | высокий                                       | низкий                                                       | высокий, средний           |
| <b>Критерии успеха</b>     | Соответствие плану                            | Отклик на изменения, работающий код                          | Совмещает RUP и «Гибкие»   |
| <b>Культура управления</b> | Командно-административная                     | Лидерство и сотрудничество                                   | Лидерство и сотрудничество |

### 3. Классификация типов программных проектов

В настоящее время большое развитие получило создание т.н. *прикладных программ*, непосредственно обеспечивающих выполнение необходимых пользователям работ. Характерными чертами данных программных проектов (ПП) являются их способность к адаптации, технологическая инновационность, креативность и открытость, а также способность решать широкий круг задач в интересах конечных пользователей.

По ступеням надёжности различают следующие типы программных проектов:

- разработанные впервые;
- существующие (разработанное ранее или покупное коммерческое);

- конфигурируемые из типовых модулей.

По влиянию на безопасность различают:

- программные проекты, которые влияют на безопасность (критическое ПО);

- программные проекты, которые не влияют на безопасность.

По масштабу (количеству участников) программных проектов:

- малые;
- средние;
- мега-проекты.

По принадлежности, данные ПП можно подразделить на следующие типы:

- офисные приложения (текстовый редактор или процессор и пр.);
- корпоративные информационные системы (аудиторская или бухгалтерская программа, система ERP и пр.);
- системы проектирования и производства (САПР, CAD и т.п.);
- научное ПО (система компьютерного моделирования и пр.);
- информационные системы;
- клиент для доступа к интернет-сервисам (электронная почта, банк клиент и пр.);
- мультимедиа (компьютерная игра, медиапроигрыватель и т.п.).

#### 4. Основные этапы подхода к созданию предметноориентированной методологии разработки ПО

Все доступные модели и методологии хороши только для определённых задач и/или проектов, в которых [эти методологии] учитывают различные технические, организационные, проектные и командные особенности и поэтому выбор методологии — один из важнейших факторов, который существенно влияет на успех проекта.

Главная трудность состоит в том, что практически невозможно точно определить объёмы задачи в самом начале проекта, а следовательно, и минимальное число людей, которые могут эту задачу решить. А если размеры проекта возрастают, может оказаться, что оптимальным решением будет применить другую методологию. Основными факторами, влияющими на выбор методологии управления проектом можно считать следующие:

- критичность проекта, при которой скрытые ошибки в программном проекте могут повлечь за собой значительный ущерб;
- цели проекта, приоритеты;
- масштаб проекта (необходимый размер команды, сложность задач);
- используемые средства разработки и внедряемые системы;
- компетентность участников команды разработки и внедрения;

- география разработки и внедрения;
- культура и традиции компании заказчика и компании-интегратора, ценности команды разработчиков.

Существующие методологии можно подразделить на два типа:

- «лёгкие» методологии — присуща низкая степень формализма;
- «тяжёлые» методологии — классические методологии с высокой степенью формализма.

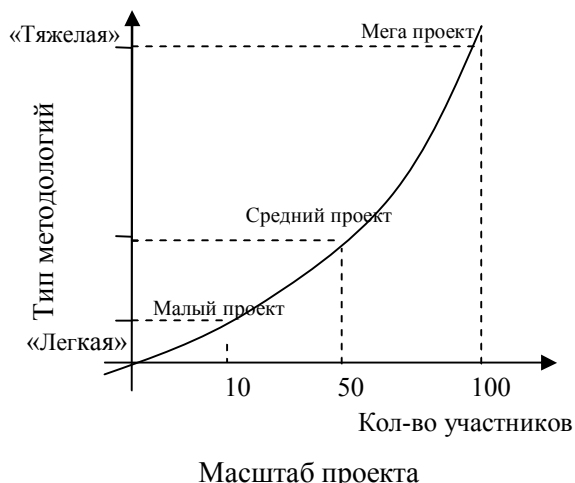


Рис. 2. Зависимость стратегии применения методологий от масштабов проекта

Другими словами, чем «легче» методология, тем продуктивнее работает команда, а беря во внимание приведенную классификацию типов ПП, можно утверждать что размеры проекта и методологии связаны между собой положительной обратной связью (рис. 2).

Следуя данному утверждению можно предположить, что один из принципов подхода к формированию стратегии разработки программного обеспечения, заключается в следующем: чем меньше масштаб проекта, тем более простой («легкий») тип методологии применяется.

#### Выводы

Предложенный подход к формированию стратегии применения методологий разработки программного обеспечения, основанный на композиции этапов различных методологий, который в отличие от существующих позволяет установить однозначное соответствие между конкретными типами программных проектов и рассматриваемыми методологиями, снизив тем самым уровень неопределенности при разработке стратегии создания программного обеспечения.

## Литература

1. Ройс У. Управление проектами по созданию программного обеспечения / У. Ройс. – М.: Лори, 1998. – 424 с.
2. Демарко Т. Человеческий фактор: успешные проекты и команды / Т. Демарко, Т. Листер. – М.: Символ-Плюс, 2005. – 256 с.
3. Анализ требований и создание архитектуры решений на основе Microsoft .NET: учеб. курс MCSD: пер. с англ. – М.: ИД "Русская Редакция", 2004. – 416 с.
4. Вигерс К. Разработка требований к программному обеспечению: пер. с англ. / К. Вигерс. – М.: ИД "Русская Редакция", 2004. – 576 с.
5. Крачтен Ф. Введение в Rational Unified Process: пер. с англ. / Ф. Крачтен. – М.: Вильямс, 2002. – 240 с.
6. Ньютон Р. Управление проектами от А до Я / Р. Ньютон. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 192 с.
7. James P.L. The Project manager's pocket survival / P.L. James. – New York: John Wiley & Sons, Inc 2002. – 246 p.
8. Бек К. Экстремальное программирование: Планирование // К. Бек, М. Фаулер; Библиотека программиста. – СПб.: Питер, 2003. – 144 с.
9. Брукс Ф.П. Мифический человек-месяц, или Как создаются программные системы / Ф.П. Брукс. – СПб.: Символ-Плюс, 1999. – 265 с.
10. Гагарина Л.Г. Технология разработки программного обеспечения / Л.Г. Гагарина, Е.В. Кокорева, Б.Д. Виснадул. – М.: ИД «ФОРУМ», 2008. – 400 с.
11. Кармайкл Э. Быстрая и качественная разработка программного обеспечения / Э. Кармайкл, Д. Хэйвуд. – М.: «Вильямс», 2003. – 400 с.
12. Амблер С. Agile Modelin/ С. Амблер. – СПб.: Изд-во "Питер", 2003. – 256 с.

Поступила в редакцию 1.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ПО ЭВМ С.Ю. Шабанов-Кушнарченко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ВЖИВАННЯ МЕТОДОЛОГІЙ РОЗРОБКИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМНИХ ПРОЄКТІВ

*I.V. Shostak, M.O. Danova*

Розглянуто існуючі методології розробки програмних проєктів, а також наведені порівняльні характеристики найбільш ефективних і часто вживаних методологій, таких як RUP, MSF, XP, Crystal та інших. Наведено класифікацію типів програмних проєктів за масштабом, надійністю, впливом на безпеку та багатьох інших. Запропоновано підхід до формування стратегії вживання методологій розробки програмного забезпечення для різних типів програмних проєктів, який дозволяє встановити однозначну відповідність між конкретними типами програмних проєктів і розглядаєними методологіями.

**Ключові слова:** методологія розробки ПП, прикладні програми, програмний проєкт, класифікація ПЗ, стратегія, масштаб проєкту.

## THE APPROACH TO FORMATION OF USAGE STRATEGY OF METHODOLOGIES IN SOFTWARE DEVELOPMENT FOR VARIOUS TYPES OF SOFTWARE PRODUCTS

*I.V. Shostak, M.A. Danova*

Existing methodologies of software products are considered and comparative characteristics of the most effective and frequently used methodologies, such as RUP, MSF, XP, Crystal and others are resulted. Classification of types of software products on scale, reliability, influence on a security and by many other things is resulted. The approach to formation of usage strategy of methodologies in software development for various types of software products which allows to establish unequivocal conformity between specific types of program projects and considered methodologies is represent.

**Key words:** methodologies in software development, application software, program project, classification of software, strategy, scale of the project.

**Шостак Ігорь Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, проф. каф. інженерії ПО Национального аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Данова Марія Александровна** – соискатель по каф. інженерії ПО Национального аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: danovamariya@gmail.com.

УДК 006.83(045)

С.П. ЯРМОЛЕНКО

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

## ГАЗОХРОМАТОГРАФІЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ТОКСИЧНИХ МІКРОДОМІШОК

*У теперішній час при визначенні показників якості мікрокомпонентів використовують застарілі тривалі методи, які потребують удосконалення. Газова хроматографія – це фізико-хімічний метод розділення, при використанні різних типів колонок. На базі газових хроматографів можна вирішувати різноманітні задачі з подальшою ідентифікацією і кількісним визначенням вмісту мікродомішок. В цьому матеріалі описаний газохроматографічний метод визначення вмісту токсичних мікродомішок в горілках та спирті енановому, з використанням капілярних колонок. Опрацювання результатів вимірювання здійснюють за допомогою програмного забезпечення персонального комп'ютера, який входить до складу комплексу хроматографа.*

**Ключові слова:** спектральні та хроматографічні методи оцінки якості, газова хроматографія, газохроматографічний аналіз, градувальні суміші, діаграми Шухарта.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Протягом багатьох років ведеться робота по створенню методології прискорення оцінки якості вимірювань, що базується на інтеграції електрохімічних, спектральних та хроматографічних методах.

В умовах нестабільності спиртовмісної сировини пріоритетним є прискорений моніторинг сировинних спиртовмісних сумішей з вузлів обліку. Основні показники якості мікрокомпонентів визначаються стандартизованими, методами, що мають невисоку точність та швидкодію. Необхідність мають розробки методик виконання вимірювань (МВВ), альтернативних застарілим ДСТУ, викликані підвищенням точності вимірювань, розширенням діапазону роботи впровадження комп'ютерної техніки.

Висока точність вимірювання і достовірність наукових результатів має велике значення, як в інженерній, так і науковій діяльності. На сьогодні існує кілька способів підвищення точності вимірювань: підвищення точності засобів вимірювання (ЗВ), удосконалення методів вимірювання, і, якщо це можливо, підвищення числа повторних вимірювань.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Газова хроматографія є фізико-хімічним методом розділення, з використанням кварцових капілярних колонок і при виборі оптимальних умов газохроматографічного аналізу, що дозволяє проводити розділення компонентів сумішей, що досліджуються з високою ефективністю [1, 2].

В процесі різноманітної діяльності людей, ін-

дивідуально кожної людини, і у взаємодії спільноти виникає багато задач, для вирішення яких необхідно мати достатню кількість і якість інформації про ту, чи іншу властивість об'єктів матеріального світу (явище, процес, речовина, параметр продукції та ін.).

Один із головних способів отримання інформації – вимірювання і методи вимірювання.

Багатократні вимірювання однією і тією ж величиною зустрічаються:

- при атестації і повірці ЗВ, вимірювальних каналів, інформаційних вимірювальних систем,
- при контролі технологічних процесів,
- при випробуванні виробів,
- при необхідності проведення експериментального статистичного опису перемінних величин,
- в науково-дослідницьких роботах [1].

### Основний матеріал

**Постановка задачі.** Розробити повний газохроматографічний метод визначення вмісту токсичних мікродомішок. Апаратурно-методичний комплекс на базі газового хроматографа, який поєднує швидку пробопідготовку, високу якість і надійність обладнання, простоту експлуатації та управління, збір, обробку, зберігання інформації з висновками хроматограм, результатів ідентифікації і кількісних розрахунків з виводом на дисплей комп'ютера і з роздруківкою результатів аналізу у вигляді звіту встановленої форми, роблять можливим ідентифікацію і кількісне визначення мікрокомпонентів з мінімальними затратами часу і праці [2].

Ідея методу ґрунтується на газохроматографічному розділенні мікрокомпонентів у дослідній пробі і наступному їх детектуванні полум'яно-іонізаційним детектором. Мікродомішки розділяються шляхом розподілу компонентів між нерухомою (стаціонарною) та рухомою (газ-носієм) фазами.

Тривалість аналізу з використанням насадкових колонок - не більше 10 хвилин, а капілярних – 15 ... 30 хвилин.

Для проведення вимірювань використовуються наступні матеріали, реактиви та апаратура

Газовий хроматограф з полум'яно-іонізаційним детектором, з рівнем флуктуаційних шумів нульового сигналу не більше  $2 \cdot 10^{-14}$  А, з дрейфом нульового сигналу детектора не більше  $2 \cdot 10^{-12}$  А/рік, з межею детектування не більше  $2 \cdot 10^{-12}$  г/с.

Колонка газохроматографічна насадкова скляна довжиною 200 см, внутрішнім діаметром 3 мм.

Комп'ютер або інтегратор, який має програмне забезпечення, розроблений на мові С++.

Мікрошприць місткістю 10 мм<sup>3</sup> по нормативному документу (НД).

Газ-носієм – гелій, зріджений в балоні за ГОСТ 9293, або азот особливої чистоти за ГОСТ 9293. Допускається використовувати генератори азоту.

Водень технічний марки А за ГОСТ 3022. Допускається використовувати генератори водню.

Повітря зріджене за ГОСТ 17433. Допускається використовувати компресор любого типу, який забезпечує необхідний тиск та чистоту повітря.

Носій твердий – целіт-545 з частками розміром 0,20...0,25 мм по НД. Допускається застосування інших твердих носіїв, які забезпечують аналогічне розділення.

Фаза нерухома – поліетиленгліколь – ПЗГ-300. Допускається застосування інших фаз, які забезпечують аналогічне розділення.

Склянка для зберігання градуовальної суміші любого типу з пробкою, яка забезпечує герметичність.

Скляна паличка. Допускається застосування апаратури, матеріалів та реактивів з характеристиками не нижче вказаних.

**Для хроматографії, які забезпечені капілярними колонками.** Газовий хроматограф з полум'яно-іонізаційним детектором, з рівнем флуктуаційних шумів нульового сигналу не більше  $2 \cdot 10^{-12}$  А, з дрейфом нульового сигналу детектора не більше  $2 \cdot 10^{-12}$  А/г, з межею детектування не більше  $2 \cdot 10^{-12}$  г/с.

Колонка газохроматографічна капілярна НР-

РРАР (СІЛА) 50м х 0,32мм х 0,52 мм. Допускається застосування інших капілярних колонок з аналогічними технічними характеристиками, які забезпечують аналогічне розділення.

Комп'ютер або інтегратор, який має програмне забезпечення.

Газ-носієм – гелій за НД.

Газ-носієм – азот зріджений в балоні за ГОСТ 9293 або азот особливої чистоти за ГОСТ 9293.

Водень технічний марки А за ГОСТ 3022. Допускається використовувати генератори водню.

Повітря зріджене за ГОСТ 17433. Допускається використовувати компресори любого типу, які забезпечують необхідний тиск та чистоту повітря.

Мікрошприць місткістю 10 мм<sup>3</sup> за НД.

Вода дистильована за ГОСТ 6709.

Спирт етиловий ректифікований за ГОСТ 5962.

Оцтовий альдегід за ГОСТ 9585, х.ч.

Метиловий ефір оцтової кислоти, х.ч.

Пропіоновий альдегід, х.ч.

Етиловий ефір оцтової кислоти, х.ч.

Метанол-яд, для хроматографії.

Пропанол-1, для хроматографії.

Спирт ізобутиловий за ГОСТ 6016.

Бутанол-1, для хроматографії.

Спирт ізоаміловий за ГОСТ 5830, х.ч.

Колба 2-100-2 за ГОСТ 25336.

Піпетки 1-2-2-10, 1-1-2-0,1 за ГОСТ 29227.

Секундомір за НД.

Термометр рідинний скляний за ГОСТ 28498.

Склянка для зберігання градуовальної суміші любого типу з пробкою, яка забезпечує герметичність.

Допускається застосування апаратури, матеріалів та реактивів з характеристиками не нижче вказаних.

**Підготовка до аналізу. Приготування насадки та стабілізація насадкової колонки.** Беруть наважку необхідної маси твердого носія (результати зважування, в грамах, записують з точністю до другого десяткового знаку).

В скляний стаканчик місткістю 50 см<sup>3</sup> беруть наважку нерухомої рідкої фази в кількості 17 % від маси твердого носія, розчиняють в ацетоні, переносять в фарфорову чашку місткістю 250 см<sup>3</sup> і присипають твердий носій. Фарфорову чашку з утвореною суспензією ставлять в витяжну шафу і при кімнатній температурі випарюють розчинник, періодично помішуючи скляною паличкою. Об'єм розчинника повинен приблизно дорівнювати об'єму твердого носія. Потім чашку поміщають в сушильну шафу при температурі 60 °С на 3 години.

Готова насадка повинна бути сипучею і не мати грудочок.

Колонку заповнюють готовою насадкою. В двухметрову колонку діаметром 3 мм повинно поміститися  $(7,0 \pm 0,5)$  г.

Заповнену колонку поміщають в термостат хроматографа і, не приєднуючи до детектора, продувають газом-носієм з швидкістю  $1,8 \dots 2,7$   $\text{дм}^3/\text{г}$  при температурі  $80^\circ\text{C}$  протягом 8 годин. Потім колонку з'єднують з детектором і перевіряють стабільність нульової лінії при робочій температурі термостата колонок.

Монтаж, наладку і вихід хроматографа на робочий режим проводять у відповідності з інструкцією, яка додається до приладу.

**Стабілізація капілярної колонки.** Капілярну колонку поміщають в термостат хроматографа і, не з'єднуючи з детектором, продувають газом-носієм з швидкістю  $0,072 \dots 0,144$   $\text{дм}^3/\text{г}$  при температурі термостата колонок  $80^\circ\text{C}$  протягом 8 годин. Потім колонку з'єднують з детектором і перевіряють стабільність нульової лінії при робочій температурі термостата колонок.

Монтаж, наладку і вихід хроматографа на робочий режим проводять у відповідності з інструкцією, яка додається до приладу.

**Приготування градувальних сумішей.** Прилад градують по штучних сумішах методом абсолютного градування. Склад градувальної суміші повинен бути близьким до проб, які аналізують.

При відсутності атестованої градувальної суміші, речовин які визначаються в горілках та спирті, її готують з чистих речовин з масовою часткою основного компонента не менше 98% на ректифікованому спирті або на водно-спиртовому розчині.

Для аналізу з використанням капілярних колонок градувальна суміш повинна містити наступні чисті речовини: оцтовий альдегід, пропіоновий альдегід, метиловий ефір оцтової кислоти, етиловий ефір оцтової кислоти, метиловий спирт, пропанол-1, ізобутиловий спирт, бутанол-1, ізоаміловий спирт.

Для аналізу з використанням насадкових колонок градувальна суміш повинна містити одну чисту речовину - метиловий спирт.

Приготування вихідної градувальної суміші об'ємною часткою компонентів 0,1%

**Приготування вихідної градувальної суміші для аналізу спирту.** В мірну колбу з пришліфованою пробкою місткістю  $100 \text{ см}^3$  наливають  $50 \text{ см}^3$  етилового ректифікованого спирту і вносять піпетками місткістю  $0,1 \text{ см}^3$  по  $0,1 \text{ см}^3$  кожної чистої речовини. Вміст колби перемішують, доводять

до мітки етиловим ректифікованим спиртом і витримують при температурі  $20^\circ\text{C}$  протягом 25 хвилин. При необхідності об'єм колби доводять до мітки етиловим ректифікованим спиртом і перемішують.

**Приготування вихідної градувальної суміші для аналізу горілок.** В мірну колбу з пришліфованою пробкою місткістю  $100 \text{ см}^3$  наливають  $50 \text{ см}^3$  водно-спиртового розчину з об'ємною часткою ректифікованого етилового спирту 40% і вносять піпетками місткістю  $0,1 \text{ см}^3$  по  $0,1 \text{ см}^3$  кожної чистої речовини. Вміст колби перемішують, доводять до мітки водно-спиртовим розчином з об'ємною часткою ректифікованого етилового спирту 40% і витримують при температурі  $20^\circ\text{C}$  протягом 25 хвилин. При необхідності об'єм колби доводять до мітки тим же водно-спиртовим розчином і перемішують.

Приготування градувальних сумішей з об'ємною часткою компонентів 0,01, 0,001 і 0,0001% оснований:

для аналізу спирту на розбавленні вихідної градувальної суміші для аналізу спирту ректифікованим етиловим спиртом;

для аналізу горілок на розбавленні вихідної градувальної суміші для аналізу горілок водно-спиртовим розчином з об'ємною часткою ректифікованого етилового спирту 40%.

Приготування градувальної суміші проводять в нормальних умовах при температурі навколишнього повітря  $18-22^\circ\text{C}$  в витяжній шафі.

Градувальну суміш зберігають в холодильнику в герметично-закритому посуді. Термін зберігання 6 місяців.

**Проведення аналізу.** Газовий хроматограф включають до роботи у відповідності з інструкцією з його експлуатації і встановлюють параметри хроматографування.

Умови хроматографування з насадковими колонками

*Газохроматографічна колонка:*

матеріал – скло;

довжина – 2 м;

внутрішній діаметр – 3 мм.

*Насадка:*

твердий носій – целіт-545 з частками розміром  $(0,20 \dots 0,25)$  мм;

нерухома фаза – ПЗГ-300, 17% від маси твердого носія;

температура термостата –  $(55 \dots 65)^\circ\text{C}$ ;

температура випаровувача (інжектора) –  $(150 \dots 200)^\circ\text{C}$ .

*Детектор іонізації в полум'ї (ДШ):*

температура детектора –  $(150 \dots 200)^\circ\text{C}$ ;

витрата повітря –  $18 \text{ дм}^3/\text{год}$ ;

витрата водню  $-1,8 \text{ дм}^3/\text{год}$ ;  
газ-носії – азот зріджений;  
швидкість потоку газу-носія –  $(1,8...2,7) \text{ дм}^3/\text{год}$ ;  
об'єм проби –  $(1...2) \text{ мм}^3$ .

Аналіз градувальних сумішей проводять не менше ніж раз на тиждень для забезпечення правильного градування приладу.

**Аналіз зразка.** На інтеграторі або комп'ютері для розрахунку даних в режимі діалогу, згідно інструкції по експлуатації інтегратора або комп'ютера, що додається до приладу, створюють метод, який визначає операції та умови, які повинні забезпечуватися по ходу обслуговування розгонки зразка, який аналізують. Для кількісного обрахунку даних складають калібровочний масив по методу абсолютного градування з врахуванням кількості мікродомішок, які містяться в водно-спиртовому розчині для аналізу горілок та в ректифікованому спирті - для аналізу спирту, на котрих готують градувальні суміші, і будують послідовність для автоматичного пробовідбірника.

В випаровувач (інжектор) вводять  $1 \text{ мм}^3$  зразка горілки або спирту і здійснюють хроматографічне розділення суміші. Реєструють піки в області часу утримання, яке відповідає компонентам градувальної суміші. Проводять два паралельних аналізу зразка.

**Обробка результатів. Показники точності методики виконання вимірювань.** Результати вимірювань вмісту мікродомішок виражають в наступних одиницях:

- метилового спирту в процентах по об'єму безводного спирту (% об.б.с);
- альдегідів, ефірів, сивушного масла - в  $\text{мг}/\text{дм}^3$  безводного спирту ( $\text{мг}/\text{дм}^3$  б.с).

*Розрахунок об'ємної частки компонентів, які визначають*

Записують результати вимірювань, отримані на інтеграторі або комп'ютері.

Для метилового спирту за остаточний результат вимірювань об'ємної частки приймають середнє арифметичне значень двох паралельних вимірювань, яке розраховують до третього десяткового знаку і округлене до другого десяткового знаку; для сортів спирту з об'ємною часткою метилового

спирту менше 0,001% – розраховане до четвертого десяткового знаку і заокруглене до третього десяткового знаку.

Розходження між кожним результатом вимірювань і середнім арифметичним значенням результатів не повинно перевищувати 10% середнього значення при довірчій імовірності  $P = 0,95$ .

*Розрахунок масової концентрації компонентів, які визначають*

Записують результати вимірювань, отриманих на інтеграторі або комп'ютері.

Результати аналізу альдегідів представляють як суму масових концентрацій, які ідентифіковані в зразку альдегідів,  $\text{мг}/\text{дм}^3$  б.с.

Результати аналізу ефірів представляють як суму масових концентрацій, ідентифікованих в зразку ефірів,  $\text{мг}/\text{дм}^3$  б.с.

Результати аналізу сивушного масла представляють як суму масових концентрацій, ідентифікованих в зразку компонентів сивушного масла,  $\text{мг}/\text{дм}^3$  б.с.

За остаточний результат вимірювань масової концентрації приймають середнє арифметичне значення результатів двох паралельних вимірювань, розраховане до другого десяткового знаку і заокруглене до першого десяткового знаку.

Розходження між кожним результатом вимірювань і середнім арифметичним значенням результатів не повинно перевищувати 15% середнього значення при довірчій імовірності  $P = 0,95$ .

Градування хроматографа виконують за контрольним зразком так часто, як це дозволяє критерій контролю якості – відносна різниця градувальних коефіцієнтів для поточного та попереднього дослідження, яка не повинна перевищувати 10 %. В якості контрольного зразка використовують градувальну суміш. Для наочності будують контрольні діаграми Шухарта.

## Література

1. ТУ У 18.426-99 Розчини водно-етанольні типові.
2. ДНАОП 0.00-1.07-94 Правила устро́йства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Затв. Держнагляд Охорони праці України, 18.10.94 р., № 104.

Надійшла до редакції 18.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інформаційних технологій В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

### ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОКСИЧЕСКИХ МИКРОПРИМЕСЕЙ

*С.П. Ярмоленко*

В настоящее время при определении показателей качества микрокомпонентов используют старые длительные методы, которые нуждаются в усовершенствовании. Газовая хроматография – это физико-химический метод разделения, при использовании различных типов колонок. На базе газовых хроматографов можно решать различные задачи с последующей идентификацией и количественным определением содержания микропримесей. В этом материале описан газохроматографический метод определения содержания токсических микропримесей в водке и спирте этиловому, с использованием капиллярных колонок.

**Ключевые слова:** спектральные и хроматографические методы оценки качества, газовая хроматография, газохроматографический анализ, градуировочные смеси, диаграммы Шухарта.

### GAS CHROMATOGRAPHY METHOD FOR DETERMINATION OF TRACE SUBSTANCES TOXIC

*S.P. Yarmolenko*

Currently, in determining the quality parameters of microcomponents using old long-term methods, which require improvement gas chromatography - a physical-chemical separation method, using different types of columns. On the basis of gas chromatographs can solve various problems with the subsequent identification and quantification of trace contents. This material is described gaschromatographic method for determining the content of toxic trace substances in the vodka and ethyl alcohol, using capillary columns

**Key words:** spectral and chromatographic methods for assessing quality, gas chromatography, gas chromatographic analysis, calibration mixtures, charts Shughart.

**Ярмоленко Сергій Петрович** – здобувач кафедри інформаційних технологій інституту інформаційно-діагностичних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: uki1111@rambler.ru.

УДК 004.93-52:378.14

С.С. МИХНЕВ, Р.О. ПЕШКУРОВ

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ОБУЧЕНИЕМ ХЕББА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗОВ ЗНАНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ

*Приведен аналитический обзор методов, позволяющих уменьшить размерность данных при классификации образов знаний обучающихся. Приведены описания терминов «траектория обучения» и «образ знаний обучающегося». Отмечено, что не все методы предварительной классификации образа знаний обучающегося позволяют обеспечить адаптивность системы обучения. Предлагается для решения задачи предварительной классификации образов знаний обучающихся при условии обеспечения адаптивной работы системы использовать инструментарий нейронных сетей. В частности, использовать нейронные сети с обучением по методу Хебба.*

**Ключевые слова:** траектория обучения, адаптивное обучение, образ обучающегося, нейронные сети, нейронные сети с обучением Хебба, факторный анализ, метод главных компонент.

### Введение

На сегодняшний день информационные технологии достаточно узко применяются в системах адаптивного обучения. В основном применение информационных технологий ограничивается системами адаптивного тестового контроля, где они позволяют в удобной форме производить тестирование и вести учет показателей успеваемости. На одном из этапов обучения в адаптивных системах возникает задача предварительной классификации образов знаний обучающихся.

В статье представлен анализ методов уменьшения размерности данных, подлежащих классификации, приведены основные преимущества использования нейронной сети с обучением по методу Хебба, для предварительной классификации образов знаний обучающихся для адаптивной системы обучения.

### 1. Основные определения и постановка задачи

Траектория обучения – совокупность мероприятий, которая позволяет добиться необходимого уровня знаний и навыков за отведенное на обучение время.

Образ знаний обучающегося – совокупность характеристик, значения которых различны для каждого индивидуума, проходящего обучение с учетом причинно-следственных связей между значениями этих характеристик на разных этапах обучения. Данные характеристики формируются на макро-

мезо- и микро-уровнях обучения (учебный курс, дисциплина, занятие).

Сформировав образ каждого обучающегося, преподаватель может сделать выводы о наиболее эффективной методике преподавания и выдачи учебного материала на каждом этапе обучения. Этапы обучения можно представить в виде многомерной «спиральной» диаграммы образа обучающегося. Термин «спиральная» для данной диаграммы связан с тем, что успеваемость по дисциплинам и другие характеристики образа обучающегося, подчиняются детерминированному причинно-следственному связям. Графическое представление «среза» диаграммы приведено на рис. 1. Возможный цикл обучения в системе адаптивного обучения представлен на рис. 2.

Рассмотрим более детально этап № 2 на диаграмме цикла обучения. На данном этапе производится предварительная классификация результатов анализа наиболее значимых характеристик обучающегося, которая подразумевает, что из множества измеренных характеристик конкретного обучающегося требуется выделить те значения, которые сильнее всего будут влиять на последующую классификацию объектов, при этом выполнив уменьшение размерности данных.

Уменьшение размерности данных – уменьшение количества характеристик, описывающих состояние объекта таким образом, чтобы потеря значимых характеристик, при дальнейшем использовании информации, сводилась к минимуму.

Выполнение данной операции позволяет уменьшить количество вычислений при последующей классификации, а также минимизировать коли-

чество передаваемой информации и свести влияние «шумов» к допустимым значениям.

## 2. Анализ методов предварительной классификации образов знаний обучающегося

На сегодняшний день основным методом для уменьшения размерности данных является факторный анализ [1, 2].

Факторный анализ (ФА) – это подход, который широко используется в психологии, политологии, социологии, экономике и др.

Основная идея метода состоит в установлении скрытых факторов, влияющих на переменные, с помощью анализа матрицы корреляций исходных данных. После этого представляется возможным отбросить данные, изменения которых минимальным образом влияют на изменения свойств объектов.

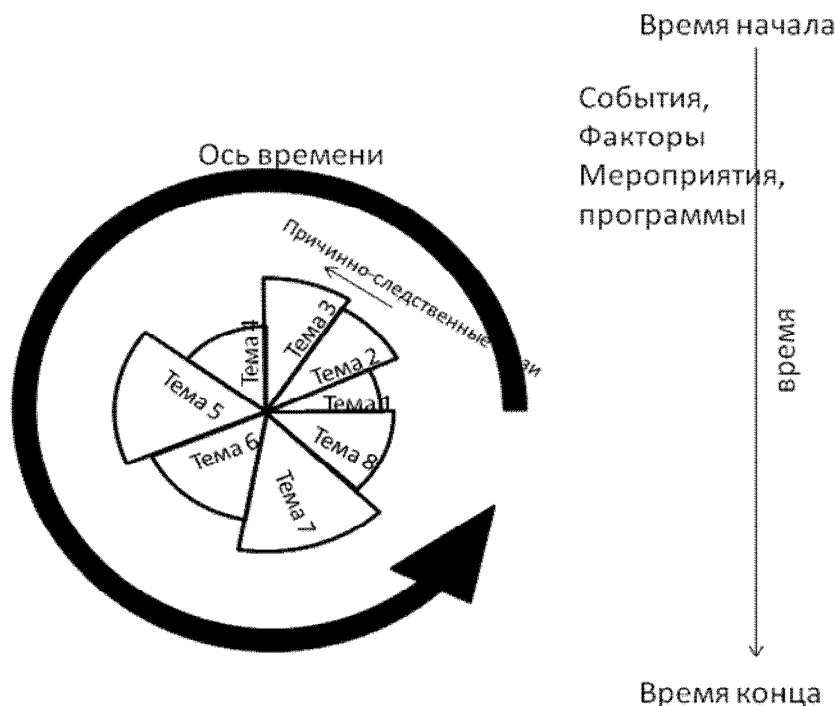


Рис. 1. Срез образа знаний обучающегося

Основные задачи ФА – установить зависимости между переменными и сокращение числа переменных.

Методы факторного анализа можно разделить, исходя из критериев «отброса факторов»:

**Критерий Кайзера.** Отброс факторов с собственными значениями меньше 1.

**Критерий «каменистой осыпи».** Определение точки на графике собственных значений, где их убывание слева направо минимально. Оба описанных фактора дают хорошие результаты при малом кол-ве факторов и большом кол-ве переменных.

**Критерий значимости.** Оценка вероятности определения «неподходящих» данных для их последующего отброса.

**Критерий доли воспроизводимой дисперсии.** Факторы ранжируются по доле детерминируемой дисперсии, когда процент дисперсии оказывается несущественным, выделение следует остановить.

**Критерий интерпретируемости и инвариантности.** Данный критерий сочетает статистическую точность с субъективными интересами. Согласно ему, главные факторы можно выделять до тех пор, пока будет возможна их ясная интерпретация.

### 2.1. Основные методы факторного анализа

Рассмотрим основные методы факторного анализа с целью определения их применимости для решения поставленной задачи:

Корреляционный анализ – метод обработки статистических данных, заключающийся в изучении коэффициентов корреляции между переменными [3, 4]. При этом сравниваются коэффициенты корреляции между одной парой или множеством пар признаков для установления между ними статистических взаимосвязей. Явным минусом данного подхода является тот факт, что его можно использовать только для определения линейных зависимостей

рассматриваемых данных, также сам по себе факт корреляционной зависимости не даёт основания утверждать, какая из переменных предшествует или является причиной изменений, или что переменные

вообще причинно связаны между собой, например, ввиду действия третьего фактора. Исходя из вышесказанного, данный подход в принципе не применим для сокращения числа переменных.



Рис. 2. Цикл обучения в адаптивной системе:

Метод максимального правдоподобия – метод оценивания неизвестного параметра путём максимизации функции правдоподобия. Основан на предположении о том, что вся информация о статистической выборке содержится в функции правдоподобия. Оценка максимального правдоподобия является популярным статистическим методом, который используется для создания статистической модели на основе данных, и выполнения оценки параметров модели. Данный метод не применим при предварительной классификации образа обучающегося, так как выполняет иную задачу: находит усредненные значения данных о совокупности, исходя из информации по случайной выборке, с помощью функции правдоподобия. Также на данный момент трудно подобрать функцию правдоподобия для статистической выборки данных об обучающемся.

Метод главных компонент (МГК) – подход к задаче уменьшения размерности данных, заключающийся в том, что оцениваются наиболее важные данные (изменения которых максимальны), после вычисления собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы исходных данных. Включает большое количество методов, реализованных для разных случаев представления данных и через разные способы их обработки. МГК – есть

метод ФА использующий процедуру ортогонального вращения факторов. Данный подход может быть использован при генерации образа обучающегося, так как основная идея данного метода совпадает с идеей выделения образа, как совокупности главных характеристик объекта, с учетом возможных нелинейных зависимостей в значениях переменных. Кроме этого, существуют достаточно простые в реализации МГК.

## 2.2. Характеристика основных аналитических подходов для метода главных компонент

Аппроксимация данных линейными многообразиями – задача наилучшей аппроксимации конечного множества точек прямыми и плоскостями. Применима для решения однотипных задач оптимизации.

Поиск ортогональных проекций с наибольшим рассеянием. Основная цель метода – найти такое ортогональное преобразование в новую систему координат, для которого выполняется следующее условие: выборочная дисперсия данных вдоль значений  $k$ -ой координаты максимальна при условии ортогональности первым  $k-1$  координатам.

Аннулирование корреляций между координатами. Для заданной  $n$ -мерной случайной величины  $X$  найти такой ортонормированный базис,  $\{a_1, \dots, a_n\}$ ,

в котором коэффициент ковариации между различными координатами равен нулю. После преобразования к этому базису  $\text{cov}(X_i, X_j) = 0$  для  $i \neq j$ .

Вышеуказанные методы неприменимы для решения поставленной задачи ввиду необходимости наличия ограниченного малого количества элементов выборки на начальном этапе работы системы, их сложной реализации и отсутствием адаптивности в этих подходах к изменениям количества и составу входных данных.

### 2.3. Характеристика нейросетевых технологий, применимых для решения задачи предварительной классификации образов

В последнее время все чаще для решения задач классификации в условиях наличия неопределенности используют инструментальный нейронных сетей [5 – 8]. Рассмотрим виды нейронных сетей (НС) наиболее применимых для решения поставленной задачи.

Самоорганизующаяся карта Кохонена – соревновательная нейронная сеть (НС) с обучением без учителя, выполняющая задачу визуализации и кластеризации. Является методом проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью. Изначально известна размерность входных данных, по ней некоторым образом строится первоначальный вариант карты. В процессе обучения векторы веса узлов приближаются к входным данным. Для каждого наблюдения выбирается наиболее похожий по вектору веса узел, и значение его вектора веса приближается к наблюдению.

Нейронная сеть с «узким горлом» – нейронная сеть, которая используется при решении задачи сжатия. Топология сети и алгоритм ее обучения таковы, что данные большой размерности требуется передать с входа нейронной сети на ее выходы через канал сравнительно небольшого размера. В процессе работы такой НС алгоритм обратного распространения ошибки минимизирует ошибку. Веса связей от входного слоя нейронов и, до серединного слоя будут работать на компрессию сигнала, а остальные – на его декомпрессию. Сети, реализующие метод «узкого горла», более пригодны скорее для эффективного сжатия данных для последующей передачи, так как в основе архитектуры данной сети лежит многослойный персептрон, обучающийся по методу обратного распространения ошибки. Кроме этого сеть может некорректно работать в случае образования случайных зависимостей в исходных данных. Возможность уменьшения размерности данных является слабовыраженным побочным эффектом

Нейронная сеть Хопфилда – обладает свойством восстанавливать сигнал по его поврежденному образу. Также позволяет реализовать задачу автоассоциативной памяти, что делает возможным сжатие данных. Данный тип НС сильно зависит от обучающего периода чтобы в дальнейшем обладать способностью возвращать значения из автоассоциативной памяти, которая сформировалась при обучении, т.е. решение задачи обеспечения адаптивности затруднительно

Сети с методом обучения по Хеббу – нейронные сети с принципом обучения, выдвинутым нейробиологом Хеббом – «усиление наиболее часто взаимодействующих связей и ослабление менее взаимодействующих». В природе сети заложена реализация метода МГК в его классическом варианте: определение собственных значений матрицы ковариации. Это позволяет уменьшать количество выходных параметров сети без боязни потери большого числа информации при генерации образа.

Следует отметить, что карта Кохонена и сеть с обучением по методу Хебба обладают похожими свойствами: обучаются без учителя, достаточно близки по устройству обучения. Однако сети Кохонена более близки к реализации многомерного шкалирования – альтернативного по отношению к МГК метода, в среднем требующего заметно большего кол-ва вычислительных операций, что скажется и на времени работы сетей. Также стоит отметить, что сети Кохонена зависят от оценки аналитика (погрешность работы сети) и длительность процесса их обучения зависит от этого параметра.

Сети с обучением по Хеббу обучаются все время жизни, что делает их более адаптивными к изменениям в данных и являются достаточно простыми в реализации, по сравнению с перечисленными выше моделями, что также является их достоинством.

## Заключение

Сети с обучением по Хеббу обучаются все время жизни, что делает их более адаптивными к изменениям в данных и являются достаточно простыми в реализации, по сравнению с перечисленными выше моделями, что также является их плюсом.

## Литература

1. Енюков И.С. Факторный дискриминатный и кластерный анализ: сборник работ / И.С. Енюков. – М.: Финансы и статистика 1989. – 215 с.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности: справ. изд. /

С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

3. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

4. Huber P.J. The Annals of Statistics / P.J. Huber // Harvard University. – 1985. – 13, No. 2. – P. 435-475.

5. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 1104 с.

6. Kohonen T. Self-Organizing Maps (Third extended edition) / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.

7. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 240 с.

8. Hopfield J.J. Neureal networks and physical systems collective computational abilities / J.J. Hopfield // Proceedings of National Academy of Science. – Vol. 79, no 8. – P. 2554-2558.

Поступила в редакцию 12.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных технологий В.П. Квасников, Национальный авиационный университет, Киев.

### ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З НАВЧАННЯ ХЕББА ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ОБРАЗІВ ЗНАНЬ УЧНІВ

*С.С. Міхнєв, Р.О. Пешкуров*

Наведено аналітичний огляд методів, що дозволяють зменшити розмірність даних при класифікації образів знань учнів. Наведено описи термінів «траєкторія навчання» і «образ знань учня». Відзначено, що не всі методи попередньої класифікації образу знань учня дозволяють забезпечити адаптивність системи навчання. Пропонується для вирішення задачі попередньої класифікації образів знань учнів за умови забезпечення адаптивної роботи системи використовувати інструментарій нейронних мереж. Зокрема, використовувати нейронні мережі з навчанням за методом Хебба.

**Ключові слова:** траєкторія навчання, адаптивне навчання, образ учня, нейронні мережі, нейронні мережі з навчанням Хебба, факторний аналіз, метод головних компонентів.

### APPLICATION OF NEURAL NETWORKS WITH HEBB'S LEARNING FOR CLASSIFICATION OF THE KNOWLEDGE OF STUDENTS

*S.S. Mikhnev, R.O. Peshkurov*

In this article analytical review of methods which allow reducing the data dimensionality in the classification of students' knowledge patterns is shown. The descriptions of the terms "teaching trajectory" and "pattern of student's knowledge" are given. It is noted that not all methods of pre-classification of students' knowledge pattern make the teaching adaptive. The use of neural networks tools is proposed to solve the problem of students' knowledge pre-classification if the adaptive system operation is possible. In particular it is possible to use the neural networks according to Hebb's teaching method.

**Key words:** trajectory learning, adaptive learning, properly trained, neural networks, neural networks with Hebbian learning, factor analysis, principal components method.

**Михнєв Сергей Сергеевич** – старший преподаватель кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга Национального университета ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: mss-keem@yandex.ru.

**Пешкуров Роман Олегович** – студент 3 курса факультета информационных технологий Национального университета ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: blazerer@mail.ru.

УДК 621(075.8)

С.М. СТЕПАНЕНКО<sup>1,2</sup>, М.С. ГОЛОВИНОВА<sup>2</sup>, В.Г. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина<sup>2</sup>Запорожский Национальный технический университет, Украина

## К ВОПРОСУ О СТАНДАРТАХ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

*Интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) наукоемких изделий является неотъемлемой частью обеспечения условий для продвижения продукции на промышленный рынок. Современная ИЛП базируется на создании в рамках группы предприятий единого информационного пространства, которое поддерживает все этапы жизненного цикла изделия. Основой стандартизации в данной сфере являются стандарты ISO. В Российской Федерации приняты национальные стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303, а в Украине приняты стандарты серии ДСТУ ISO 10303. Все эти стандарты гармонизированы с соответствующими стандартами ISO. Имеющаяся нормативная база позволяет в полной мере развивать систему ИЛП на предприятиях разработчика – производителя – эксплуатанта.*

**Ключевые слова:** логистика, интегрированная логистическая поддержка, жизненный цикл, CALS, стандарт, интерактивное электронное техническое руководство.

### 1. Цели и практические задачи интегрированной логистической поддержки

Интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) изделия представляет собой совокупность процессов, организационно-технических мероприятий и регламентов работ, которые осуществляются на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) изделия: от его разработки до утилизации. Главной целью внедрения ИЛП является сокращение «расходов на владение изделием», которые для сложного наукоемкого изделия могут быть равными или даже превышать расходы на его закупку. Компьютеризованная система логистической поддержки является основным современным инструментом решения задач ИЛП. Построение такой компьютеризированной системы немыслимо без опоры на систему специализированных стандартов.

### 2. Анализ состояния современной нормативной базы по вопросам ИЛП

Современная ИЛП базируется на создании в рамках группы предприятий единого информационного пространства, которое поддерживает все этапы ЖЦ продукции, которая выпускается. Идея единого информационного пространства и информационной интеграции этапов ЖЦ стала базовой в подходе, который получил название CALS – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла. В широком смысле слова CALS – это мето-

дология создания единого информационного пространства промышленной продукции, которое обеспечивает взаимодействие всех промышленных автоматизированных систем. В этом смысле предметом CALS являются методы и средства как взаимодействия разных автоматизированных систем и их подсистем, так и сами автоматизированные системы с учетом всех видов их обеспечения. В настоящее время идея CALS сформировалась в целом направление в области информационных технологий и оформилась в виде стандартов ISO, национальных (государственных) стандартов и нормативных документов отраслей и отдельных предприятий.

Стандарты – это основные "строительные" блоки ИЛП и CALS, которые описывают правила электронного представления данных об изделиях, информационную среду и процессы, а также правила обмена этими данными. Основой стандартизации в данной сфере вопросов являются стандарты ISO. На их основе в странах, которые внедряют у себя системы ИЛП и CALS приняты национальные стандарты, гармонизированные с соответствующими стандартами ISO. В Российской Федерации – это стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303, в Украине – соответственно стандарты серии ДСТУ ISO 10303. Базовыми стандартами, определяющими представление информации о продукте, являются: стандарт ДСТУ ISO 10303-1-2007, в котором приводится обзор и основные принципы системы промышленной автоматизации и интеграции представления данных относительно изделий и обмена данными; стандарт ДСТУ ISO 10303-11-2007, содержащий справочное

руководство по информационному языку EXPRESS, который рекомендуется для применения в CALS-технологиях; стандарт DCTV ISO 10303-41-2007, содержащий требования по представлению данных об изделии и обмену этими данными; а также другие стандарты серии DCTV ISO 10303.

В России также приняты и введены в действие рекомендации по стандартизации P50.1.031-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Терминологический словарь. Часть 1. Терминология, относящаяся к стадии жизненного цикла продукции» и P50.1.032-2001. «Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Терминологический словарь. Часть 2. Основные термины и определения методологии и функциональных объектов в стандартах серии ISO 10303». Эти рекомендации устанавливают термины и определения понятий в области CALS-технологий. Установленные термины рекомендуются для применения во всех видах документации и литературы по технологии непрерывной информационной поддержки жизненного цикла продукции. Рекомендации по стандартизации P50.1.027-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Автоматизированный обмен технической информацией. Основные положения и общие требования» распространяются на обмен конструкторскими, технологическими, программными и другими проектными данными, представленными в электронном виде, между организациями или информационными системами. Рекомендации определяют основные правила формирования пакета технических данных для электронного обмена, форматы представления технических данных об изделии, а также устанавливают требования и соглашения, связанные с логическим распознаванием файлов независимо от среды передачи технической информации.

Особое место в системе ИЛП отводится созданию интерактивных электронных технических руководств. Как известно, для наукоемких промышленных изделий затраты на создание и поддержку эксплуатационной технической документации могут составлять значительную часть в общих расходах на эксплуатацию самого изделия. Можно выделить несколько основных проблем, связанных с использованием традиционных бумажных руководств: поддержание в актуальном состоянии документации, в связи с необходимостью учета множества изменений, которые вносятся в нее в процессе эксплуатации изделия; полное и однозначное представление эксплуатационной информации; поддержание физической целостности документации.

В соответствии со стратегией CALS решения этих проблем заключается в переводе всех данных,

необходимых для создания и поддержки технических пособий, в электронный формат и создание единого информационного пространства. Потребитель как участник ЖЦ изделия, также нуждается в доступе в единое информационное пространство. Средством, которое обеспечивает такой доступ, должно стать интерактивное электронное техническое руководство, которое входит в систему интегрированной логистической поддержки изделия.

Интерактивные электронные технические руководства – это структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, призванный предоставить в интерактивном режиме справочную и описательную информацию об эксплуатационных и ремонтных процедурах, связанных с конкретным изделием. Самые сложные интерактивные электронные технические руководства дают возможность прямого взаимодействия с модулями диагностики изделий, а также организации автоматизированного заказа запасных частей и материалов.

В России приняты и введены в действие рекомендации по стандартизации P50.1.029-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Интерактивные электронные технические руководства. Общие требования к содержанию, стилю и оформлению», определяющие требования к стилю, содержанию и средствам диалогового общения с пользователем, и P50.1.030-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Интерактивные электронные технические руководства. Логическая структура базы данных», определяющие представление технических данных, а также дающие производителям промышленных изделий рекомендации по подготовке интерактивных электронных технических руководств и осуществлению разных функций материально-технического обслуживания.

Таким образом, очевидно, что и в России, и в Украине существует достаточно развитая, гармонизированная с международными стандартами, нормативная база по ИЛП и CALS-технологиям, позволяющая промышленным предприятиям адекватно отвечать на запросы современного рынка, касающиеся послепродажного обслуживания в первую очередь наукоемких изделий длительного использования.

### **3. Анализ требований нормативных документов к проектным и изготавливающим предприятиям по ИЛП**

Основываясь на требованиях нормативных документов о необходимости включения вопросов логистической поддержки наукоемкой продукции начиная с самых ранних стадий её создания, в на-

стоящее время заказчики выдвигают достаточно широкий круг вопросов, подлежащих решению уже на этапе проектирования изделий. К таким вопросам относятся следующие. Разработка Плана-Программы ИЛП с обязательным утверждением его у заказчика. Заключение долгосрочных контрактов с поставщиками подсистем и комплектов запасных частей. Организация процесса ИЛП всей системы, которая связана с ЖЦ изделия, и которая должна включать: определение ответственных за ИЛП систему; определение технических и человеческих ресурсов и средств по выполнению задач; разработку графика поставки документации продуктов ИЛП и создание их перечня.

Организация процесса ИЛП должна базироваться на результатах проведения анализа логистической поддержки системы. В обязательном порядке должно быть сделано описание процесса анализа логистической поддержки системы с рассмотрением таких вопросов как: описание общего подхода к анализу логистической поддержки; перечень конкретных заданий, действий, анализов и итоговых документов; детальное изложение методологии анализов, для оценки заказчиком достаточности такой методологии; перечень дополнительных видов анализа логистической поддержки.

Уже на стадии разработки проекта изделия, для его последующей логистической поддержки, заказчик требует создание аппарата интеграции и контроля подсистем; разработки перечня запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП) для эксплуатации, ремонта и технического обслуживания системы, основанный на анализе логистической поддержки. При создании ИЛП изделия должен также быть разработан и утвержден План-Программа по обеспечению ЗИП; а также составлен каталог ЗИП с ценами.

Стандартами по ИЛП предусматривается также разработка технических руководств, необходимых для эксплуатации, ремонта и технического обслуживания системы с учетом международных требований к техническим руководствам, выполняемым с использованием общей базы данных ASD S1000D; разработка подхода по обеспечению качества технических руководств; создание перечня технических руководств; разработка и утверждение Плана-Программы по техническим руководствам; создание и введение единственной системной документации технических руководств.

Важную роль в ИЛП играет обучение персонала, который будет осуществлять эксплуатацию, ремонт и техническое обслуживание изделия. Поэтому, составной частью в ИЛП является разработка

Программы технического обучения персонала; разработка перечня предлагаемых курсов, учебного оборудования и учебных материалов; разработка и утверждение Плана-Программы по техническому обучению.

Кроме этого ИЛП предусматривает: создание перечня средств наземного обслуживания (стандартных и специальных), основанного на анализе логистической поддержки; создание и ведение единственного системного перечня анализов и рекомендаций по средствам наземного обслуживания; составление каталога средств наземного обслуживания с ценами; разработку и утверждение Плана-Программы по средствам наземного обслуживания; разработку и утверждение Плана-Программы обеспечения транспортабельности и хранения изделия; разработку и утверждение Плана-Программы обеспечения утилизации.

Приведенный перечень основных мероприятий, необходимых при развертывании работ по логистической поддержке наукоемкого изделия, показывает насколько детально в современных нормативных документах проработаны вопросы формирования ИЛП и какую роль должны играть участники общего процесса для реального внедрения ИЛП.

В качестве основных факторов, которые влияют на организацию ИЛП на предприятиях, и ресурсов предприятия, необходимых для обеспечения ИЛП, можно выделить следующее. Факторы, которые обеспечивают организацию ИЛП, – это в первую очередь интеграция разработчик – производитель – эксплуатант. К основным факторам также следует отнести: наличие национальной нормативной базы по ИЛП, наличие соответствующей законодательной базы и необходимого финансирования. К ресурсам, необходимым предприятию для обеспечения ИЛП в первую очередь следует отнести: послепродажное и конструкторское сопровождение; наличие базы технического обучения персонала; наличие службы эксплуатационно-ремонтного направления; наличие развитого информационного комплекса, интегрированного в единую информационную среду ИЛП изделия.

## Выводы

Существующая система международных стандартов ISO по ИЛП, национальных (государственных) стандартов, которые в России и Украине гармонизированы с международными, а также стандартов других уровней, позволяет создавать систему ИЛП наукоемких изделий и успешно конкурировать с подобной продукцией на мировом рынке.

*Поступила в редакцию 31.05.2010*

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. В.В. Погосов, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

## ДО ПИТАННЯ ПРО СТАНДАРТИ ІНТЕГРОВАНОЇ ЛОГІСТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБІВ

*С.М. Степаненко, М.С. Головінова, В.Г. Харченко*

Інтегрована логістична підтримка (ІЛП) наукомістких виробів є невід'ємною частиною забезпечення умов для просування продукції на промисловий ринок. Сучасна ІЛП базується на створенні в рамках групи підприємств єдиного інформаційного простору, який підтримує всі етапи життєвого циклу виробу. Основою стандартизації в даній сфері є стандарти ISO. У Російській Федерації прийняті національні стандарти серії ГОСТ Р ІСО 10303, а в Україні прийняті стандарти серії ДСТУ ISO 10303. Всі ці стандарт, гармонізовані з відповідними стандартами ISO. Наявна нормативна база дозволяє повною мірою розвивати систему ІЛП на підприємствах розробника - виробника - експлуатанта.

**Ключові слова:** логістика, інтегрована логістична підтримка, життєвий цикл, CALS, стандарт, інтерактивне електронне технічне керівництво

## TO A PROBLEM OF STANDARDS RELATED TO INTEGRATED LOGISTICAL SUPPORT OF PRODUCT LIFE CYCLE

*S.M. Stepanenko, M.S. Golovinova, V.G. Kharchenko*

Integrated logistical support (ILS) of the science intensive products is an integral part of providing a condition for the products promoting to industrial market. The current ILS is based on the creation of a common information space within the frameworks of group of enterprises, which supports all phases of a product life cycle. ISO standards are considered a standardization basis in this sphere. In Russian Federation the national standards of ГОСТ Р ІСО 10303 series are accepted, while the standards of ДСТУ ISO 10303 series are accepted in Ukraine. The all these standards are harmonized with the corresponding ISO standards. The normative basis available makes it possible to develop ILS system in a full amount at the enterprises of Designer-Producer-Operator.

**Key words:** logistics, integrated logistical support, life cycle, CALS, standard, interactive electronic technical manual.

**Степаненко Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, начальник отдела государственного предприятия «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина, e-mail: 03531@ivchenko-progress.com.

**Головинова Мария Сергеевна** – студентка 5 курса Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: maria79@i.ua.

**Харченко Виталий Григорьевич** – заместитель начальника НИО государственного предприятия «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина, e-mail: v.harchenko@ivchenko-progress.com.

УДК 62-5

О.Н. ПАРШАКОВА<sup>1</sup>, Е.Ю. ЕГОРОВА<sup>2</sup>, Т.А. БОЖЕНЕНКО<sup>3</sup><sup>1</sup>Харьковский институт экономики рыночных отношений и менеджмента, Украина<sup>2</sup>Харьковский автодорожный университет, Украина<sup>3</sup>Харьковский аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», УкраинаСТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОММУНИКАТИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
INTERNET-ПРЕДПРИЯТИЯ

Выполнен стратегический анализ коммуникативной эффективности от использования инструментов комплекса маркетинга в INTERNET-среде на основе данных статистики посещений сайта. Рассмотрена динамика посещений, звонков и заказов. Выявлен рост коммуникаций вновь созданного INTERNET-предприятия. На основе маркетингового анализа коммуникативной эффективности разработаны стратегии роста коммуникативной эффективности от использования инструментов комплекса маркетинга в INTERNET-среде. Динамика посещений, звонков и заказов позволяет выявить рост коммуникаций вновь созданного INTERNET-предприятия за первые три месяца его существования и разработать эффективные стратегии развития. При этом подразумевается дальнейшая раскрутка сайта предприятия как самостоятельное маркетинговое направление.

**Ключевые слова:** коммуникативная эффективность, комплекс маркетинга, экономическая эффективность коммуникаций, мониторинг коммуникаций, корреляционное поле, коэффициент корреляции, профиль пользователя.

## Введение

Структура коммуникативной политики включает два направления: общение и взаимодействие; неличностные коммуникации, как процесс манипулирования средствами и методами коммуникаций.

Межличностные коммуникации осуществляются между двумя и более лицами, общающимися без/с использованием средств коммуникаций (телефон, телевидение, сети), неличностные коммуникации осуществляются в условиях отсутствия личного контакта и обратной связи с использованием средств массового и избирательного воздействия информации в зависимости от сложившейся среды (печать, радио, телевидение, графика) [1].

1. Анализ статистики посещений сайта  
INTERNET-предприятия

Анализ коммуникативной эффективности INTERNET-предприятия проводится на основе данных статистики посещений сайта, звонков и количеству продаж (по трем первым месяцам существования предприятия). Статистические данные по посещениям сайта пользователей приведены на рис. 1. Звонки и проведенные по ним операции (оформленные заказы клиентов) указаны по среднему значению – за 29 рабочих дней в месяце. Анализ динамики посещений, звонков и заказов выявляет значительный рост коммуникаций вновь созданного предприятия: темпы роста составляет 66,36%, что

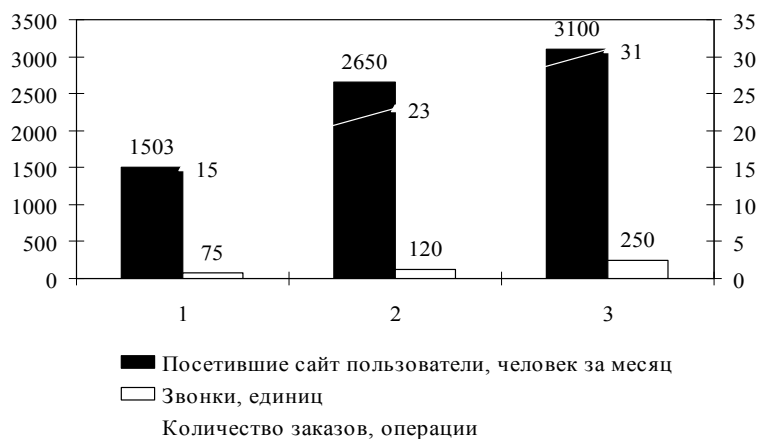


Рис. 1. Динамика коммуникативной активности пользователей сайта предприятия

невозможно сравнить с традиционной средой продаж товаров.

Проведение предварительного анализа наличия связи между двумя признаками: количеством посещений сайта INTERNET–предприятия и количеством поступивших на предприятие заказов клиентов за месяц, дает возможность построить корреляционное поле.

## 2. Результаты стратегического анализа коммуникативной эффективности

Проверка зависимости количества посещений сайта (X) от количества обращений на предприятие (звонков за месяц В), позволяет графически представить корреляционное поле, приведенное на рис. 2.

По виду корреляционного поля можно предположить, что между признаками имеет место прямая линейная связь [2].

Уравнение тренда имеет вид:

$$y = a \cdot X + b = 0,0543 \cdot X - 0,0618. \quad (1)$$

Учитывая, что число  $b = -0,0618$ , – отрицательно, то, можно предположить увеличение количества обращений.

При этом количество полезных звонков будет ограничено за счет отсутствия информации.

Значения коэффициентов корреляции:

за 1-й месяц – 0,997682;

за 2-й месяц – 0,999974;

за 3-й месяц – 0,999974,

что подтверждает прямую, связь между количеством посещений сайта (X) и количеством обращений.

На втором этапе выполняется анализ наличия связи между признаками: общее количество звонков и количество полученных предприятием заказов, при этом строится корреляционное поле, показанное на рис. 3.

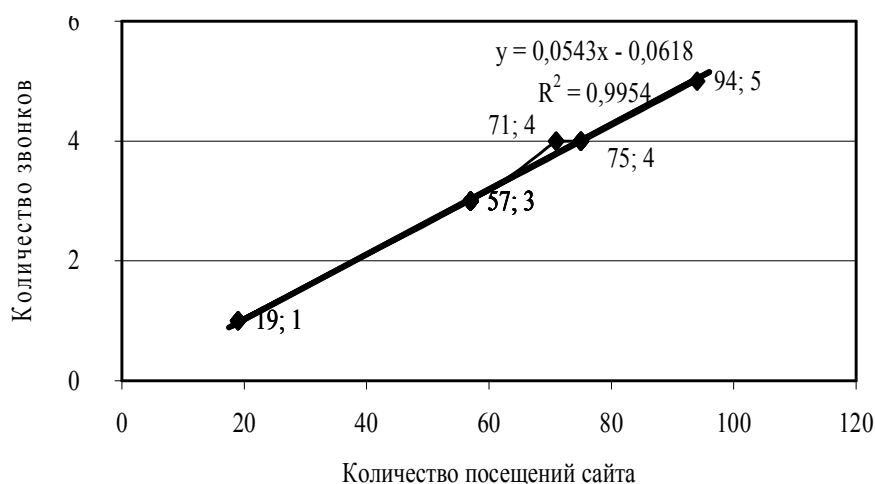


Рис. 2. Корреляционное поле зависимости количества посещений сайта (X) от количества обращений на предприятие (звонков за месяц В)

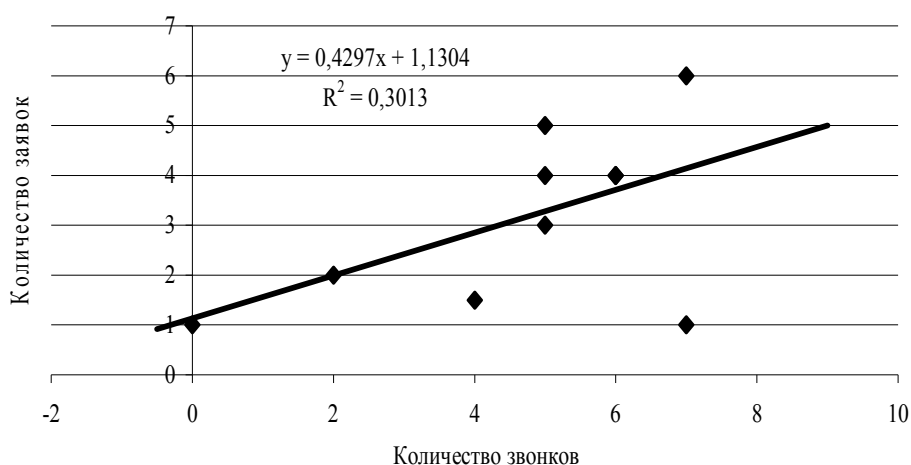


Рис. 3. Корреляционное поле признаков: количество звонков и количество заявок предприятия

Положительный знак коэффициента корреляции  $K = +0,548917489$  указывает на направление

связи между признаками, а именно, подтверждает прямую связь между признаками.

Величина коэффициента свидетельствует о прямой, значительной зависимости между признаками.

Линейный тренд  $y = a \cdot X + b = 0,4297x + 1,1304$  свидетельствует о возрастании связи параметров с увеличением времени существования

предприятия в виртуальной среде.

Обобщенный анализ наличия связи между численностью пользователей, количеством звонков и количеством заказов, полученных предприятием за три месяца работы, представлен графически на рис. 4.

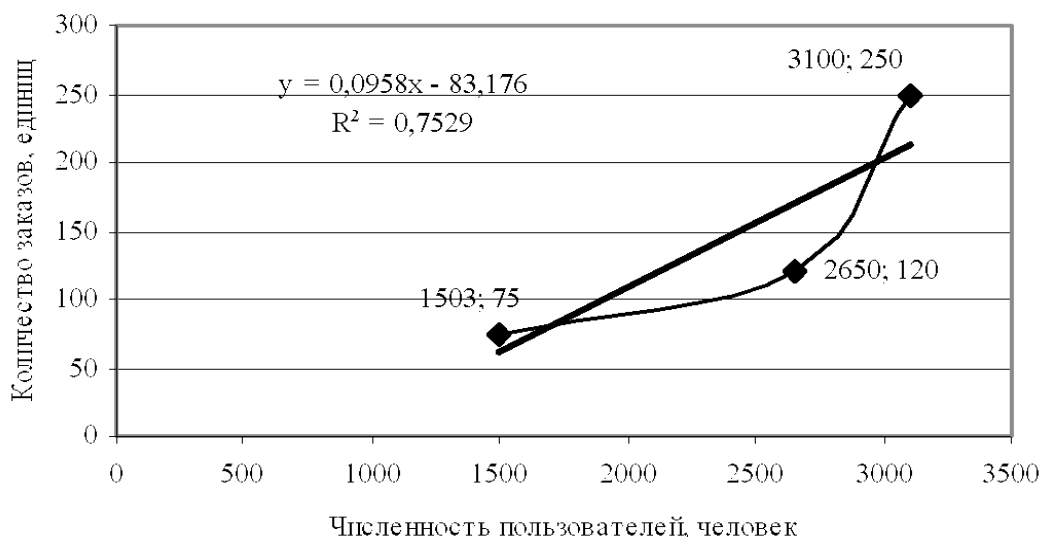


Рис. 4. Корреляционное поле признаков: численность пользователей и количество заказов, поступивших на предприятие за три месяца

### 3. Рекомендации по активизации коммуникативной политики

На основании анализа коммуникативной эффективности сайта предприятия можно констатировать [6]:

- количество звонков, поступающее на INTERNET-предприятие прямопропорционально зависит от числа пользователей сайта, что обязывает усиленно заниматься продвижением не только продукции предприятия, его торговой марки, но и непосредственно сайта;

- между численностью заказов, количеством пользователей сайта и количеством звонков на предприятие выявлена тесная прямая связь, что подтверждает задачу дальнейшей раскрутки сайта в INTERNET-среде;

- во избежание звонков, имеющих целью узнать более подробную информацию о предприятии, и, следовательно, представляющих «шум», следует более четко освещать изменения в продуктовой и ценовой информации на сайте.

Соответственно, по результату анализа эффективности коммуникаций можно сформировать направления развития и управленческих решений, по развитию INTERNET-предприятия и построить

профили пользователей. Предметом анализа клиентов предприятия могут быть классификации пользователей, выделение целевых групп пользователей, их потребностей, мотивов поведения и выявление факторы влияния.

Для сбора информации для усиления маркетингового давления на целевой рынок в INTERNET-среде желательно пользоваться возможностью получения информации от пользователей при разговорах по телефону (опрос).

Опрос – самая распространенная и важная форма сбора данных в маркетинге. Он может проводиться в форме ненавязчивого интервью при разговоре с клиентом, и позволяет выяснить наиболее проблемные вопросы предприятия

Подразумевается, что при этом станет возможным и формирование базы данных по конкурентам; по такому принципу это потребует незначительных затрат времени и денежных средств, а потому возникает целесообразность ее формирования и ведения [2, 3].

При проведении опроса по заранее разработанной анкете, в телефонном режиме следует объяснять респондентам, что данные будут использованы в обобщенном виде и никак не отразятся лично на каждом из пользователей.

## Литература

1. Багиев Г.Л. *Маркетинг* / Г.Л. Багиев, В. Тарасевич. – М.: Экономика, 1999. – 68 с.
2. Березин И. *Практика исследования рынков* / И. Березин. – М.: Бератор-Пресс, 2003. – 374 с.
3. Катернюк А.В. *Современные рекламные технологии: коммерческая реклама: учеб. пос.* / А.В. Катернюк. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. – 390 с.
4. Королько В. *Основы публичных релейшнз: учебник* / В. Королько. – М.: Рефл-бук; К.: Ваклер, 2000. – 290 с.
5. Россинтер Дж.Р. *Реклама и продвижение товаров* / Дж.Р. Россинтер; пер. с англ. под ред. Л.А. Волковой. – Л. – С.-П.: Питер, 2000. – 660 с.
6. Матанцев А.Н. *Эффективность рекламы* / А.Н. Матанцев. – М.: Финпресс, 2002. – 480 с.

Поступила в редакцию 31.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, доцент В.Ф. Сорокин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## СТРАТЕГІЧНИЙ АНАЛІЗ КОМУНІКАТИВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ INTERNET-ПІДПРИЄМСТВА

*О.Н. Паршакова, Е.Ю. Єгорова, Т.А. Божененко*

Виконаний стратегічний аналіз комунікативної ефективності від використання інструментів комплексу маркетингу в INTERNET-середовищі на основі даних статистики відвідин сайту. Розглянута динаміка відвідин, дзвінків і замовлень. Виявлено зростання комунікацій знов створеного INTERNET-підприємства. На основі маркетингового аналізу комунікативної ефективності розроблені стратегії зростання комунікативної ефективності від використання інструментів комплексу маркетингу в INTERNET-середовищі. Динаміка відвідин, дзвінків і замовлень дозволяє виявити зростання комунікацій знов створеного INTERNET-підприємства за перші три місяці його існування і розробити ефективні стратегії розвитку. При цьому мається на увазі подальше розкручування сайту підприємства як самостійний маркетинговий напрям.

**Ключові слова:** комунікативна ефективність, комплекс маркетингу, економічна ефективність комунікацій, моніторинг комунікацій, кореляційне поле, коефіцієнт кореляції, профіль користувача.

## STRATEGIC ANALYSIS OF COMMUNICATIVE EFFICIENCY OF INTERNET- ENTERPRISE

*O.N. Parshakova, E.Y. Egorova, T.A. Bozhenenko*

The strategic analysis of communicative efficiency is executed from the use of instruments of marketing complex in An INTERNET-environment on the basis of information of statistics of visits of site. The dynamics of visits, bells and orders is considered. Growth of communications OF THE accrued INTERNET-ENTERPRISE is exposed. On the basis of marketing analysis of communicative efficiency strategies of growth of communicative efficiency are developed from the use of instruments of marketing complex in an INTERNET-environment. Loud speaker of visits, bells and orders allows to expose growth of communications of the accrued INTERNET-enterprise for the first three months of his existence and develop effective strategies of development. The further untwisting of site of enterprise as independent marketing direction is thus implied.

**Key words:** communicative efficiency, marketing complex, economic efficiency of communications, monitoring of communications, correlation field, coefficient of correlation, type of user.

**Паршакова Ольга Николаевна** – зав. кафедрой информационных систем и технологий и экономической кибернетики Харьковского института экономики рыночных отношений и менеджмента, Харьков, Украина, e-mail: parshakova\_olga@mail.ru.

**Егорова Екатерина Юрьевна** – магистрант по спец. «Экономика предприятия» Харьковского автомобильного университета, Харьков, Украина, e-mail: egorova\_k@mail.ru.

**Божененко Тамара Афанасьевна** – научный сотрудник Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.