

УДК 621.438+681.58.52/54

С.В. ЕПИФАНОВ¹, Я.М. ФЕЛЬДШТЕЙН², С.Г. КОЛОМИЙЧУК¹

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²Compressor Controls Corporation, США

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПРЕССОРОВ

Рассмотрена методика выявления неисправностей каналов измерения параметров рабочего процесса промышленных компрессоров, разработан алгоритм диагностирования измерительных каналов.

компрессор, измерительный канал, напорная характеристика, КПД, достоверность диагностирования

Постановка задачи

Промышленные компрессоры предназначены для сжатия газообразного рабочего тела. Они используются в различных промышленных производствах, где рабочим телом является воздух, ацетилен, природный газ и др., а также в газотранспортной отрасли, где рабочим телом является природный газ.

Контроль рабочего процесса и управление осуществляется по значениям измеряемых параметров, в состав которых входят:

- давление на входе P_s ;
- давление на выходе P_d ;
- температура на входе T_s ;
- температура на выходе T_d ;
- перепад давлений на входном конфузоре ΔP_o ,

используемый для определения расхода рабочего тела.

Рассматриваемые компрессоры имеют высокие показатели надежности, поэтому следует ожидать, что вероятность неисправности измерительной системы выше вероятности неисправности объекта. Это обстоятельство определяет необходимость оснащения системы контроля объекта функцией выявления неисправностей датчиков.

Изменения измеренных значений указанных параметров могут быть обусловлены как неисправно-

стями измерительных каналов, так и изменением условий работы компрессора. Очевидно, такие неисправности измерительных каналов, как обрыв или короткое замыкание электрических цепей, которые приводят к выходу измеренных значений за границы рабочего диапазона, выявляются просто на основании автономного анализа каждого из параметров, и поэтому в дальнейшем они не рассматриваются.

Таким образом, в дальнейшем исследуется задача выявления неисправностей измерительных каналов (ИК), проявляющихся в отклонениях результатов измерений от истинных значений при следующих предположениях:

- измеренные значения находятся в пределах рабочего диапазона соответствующих параметров;
- неисправности имеют единичный характер, то есть вероятность одновременного возникновения неисправностей в двух и более измерительных каналах равна нулю.

Известно, что задача распознавания таких неисправностей в рассматриваемом случае, когда объект (компрессор) является многорежимным и изменяет свои параметры под действием разнообразных внешних условий, может быть решена только методами, основанными на учете связей между измеряемыми параметрами, обусловленными особенностями рабочего процесса.

Для рассматриваемого объекта – компрессора – эти связи могут быть представлены как характеристики компрессора зависимости степени повышения давления R_c и политропного КПД η_p от приведенной частоты вращения n_r и приведенного объемного расхода $Q_{s,r}$ (рис. 1):

$$R_c = f(n_r, Q_{s,r}); \quad (1)$$

$$\eta_p = f(Q_{s,r}). \quad (2)$$

Связь этих параметров с измеряемыми определяется следующими соотношениями:

$$Q_{s,r} = Q_s \left(\frac{n_o}{n_r} \right); \quad (3)$$

$$R_c = \frac{P_d}{P_s}; \quad (4)$$

$$\eta_p = \frac{k-1}{k} \frac{\lg\left(\frac{P_d}{P_s}\right)}{\lg\left(\frac{T_d}{T_s}\right)}; \quad (5)$$

$$Q_s = A \sqrt{\frac{\Delta P_o Z_s R T_s}{P_s}}; \quad (6)$$

$$n_r = n \sqrt{\frac{Z_o R_o T_o}{Z_s R T_s}}, \quad (7)$$

где Q_s – физический (не приведенный) объемный расход;

η_p – политропный КПД;

n_o – базовое значение частоты вращения;

k – коэффициент изэнтропы;

Z_s – коэффициент сжимаемости;

R – газовая постоянная;

Z_o, R_o и T_o – базовые значения соответствующих параметров.

Значение газовой постоянной зависит от состава газа, поэтому неисправности ИК на нее не влияют.

В общем случае, значения k и Z_s зависят от состава газа, его температуры T_s и давления P_s . В дальнейшем будем считать, что неисправности измерительных каналов (ИК) не приводят к существенным погрешностям определения k и Z_s .

Характеристики (1) и (2) отражают свойства компрессора и при сохранении его технического состояния остаются неизменными.

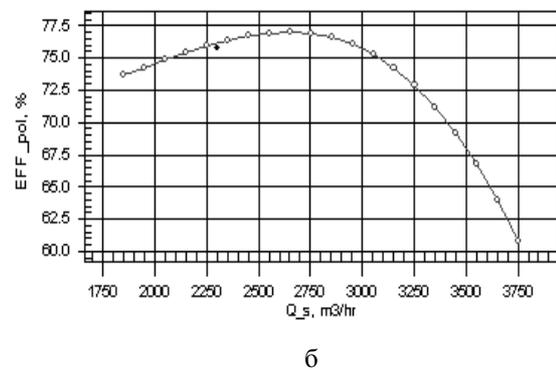
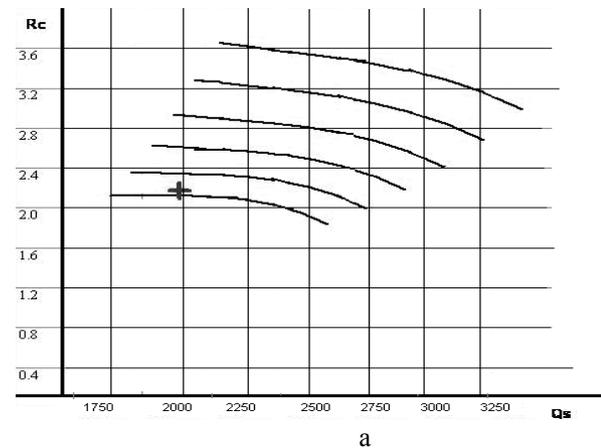


Рис. 1. Характеристика компрессора, представляющая связи между нормальными значениями параметров: а – напорная; б – КПД

Текущий режим работы компрессора может быть изображен на этих характеристиках в виде рабочей точки. Если неисправность ИК вызывает изменения параметров-аргументов или параметров-функций зависимостей (1) и (2), то соответствующие рабочие точки смещаются. Поэтому, считая исходную характеристику нормой, можно вычислить нормальное значения

$$R_{c,n} = f_n(n_r, Q_{s,r}), \eta_{p,n} = f_n(Q_{s,r}) \quad (8)$$

и определить относительные отклонения

$$\delta R_c = \frac{R_c - R_{c,n}}{R_{c,n}} = \frac{R_c}{R_{c,n}} - 1; \quad (9)$$

$$\delta R_p = \frac{\eta_p - \eta_{p,n}}{\eta_{p,n}} = \frac{\eta_p}{\eta_{p,n}} - 1, \quad (10)$$

где $R_{c,n}$ и $\eta_{p,n}$ – значения, рассчитанные по формулам (4) и (5).

Наличие двух различных функций (1) и (2), связывающих параметры рабочего процесса, обеспечивает принципиальную возможность распознавания рассматриваемых дефектов в пространстве отклонений (δR_c , $\delta \eta_p$). Однако эта возможность реализуется только при выполнении следующих условий [1]:

- указанные отклонения чувствительны к каждой из этих неисправностей;
- отклонения (9), (10) значительны для каждой из неисправностей;
- каждая из неисправностей обуславливает специфический характер изменения отклонений (9), (10), не совпадающий с характером, обусловленным другими неисправностями.

Анализ наличия связей между неисправностями ИК и параметрами

Проанализируем каждую из неисправностей ИК с целью определения, на какие из параметров, входящих в формулы (8), (9), (10), они влияют. Результаты представлены в таблице 1 («+» – влияют; «-» – не влияют).

Таблица 1
Влияние значений измеряемых параметров на значения вычисляемых параметров

Изм. параметры	Вычисляемые параметры								
	Q_s	$Q_{s,r}$	n_r	$R_{c,n}$	$\eta_{p,n}$	R_c	η_p	δR_c	$\delta \eta_p$
T_s	+	+	+	+	+	-	+	+	+
T_d	-	-	-	-	-	-	+	-	+
P_s	+	+	-	+	+	+	+	+	+
P_d	-	-	-	-	-	+	+	+	+
ΔP_o	+	+	-	+	+	-	-	+	+

Как показывает табл. 1, все анализируемые неисправности ИК проявляются в изменении отклонений (9), (10). Однако распознать на рассмотренном качественном уровне (анализируя лишь наличие или отсутствие изменений, а не их количественные значения) можно только неисправность ИК температу-

ры на выходе из компрессора, так как она вызывает изменение отклонения КПД компрессора, не изменяя отклонение степени повышения давления. С учетом наличия погрешностей и эта особенность в чистом виде не проявляется. Остальные неисправности приводят к одновременному изменению обоих отклонений. Поэтому для дальнейшего анализа необходимо использовать количественные соотношения между параметрами. Наиболее простой подход основан на анализе чувствительности или линейном приближении [3]. Однако в данном случае можно применить более точный анализ

Анализ задачи в нелинейном приближении

Аппроксимируем характеристики (8) полиномиальными функциями для обеспечения возможности их аналитического определения. Для рассмотренного выше примера (см. рис. 1) эти функции имеют следующий вид:

$$R_{c,n} = 2,3918 - 0,3667 \frac{Q_{s,r}}{350} - 1,6163 \frac{n_r}{5000} + 6,5864 \cdot 10^{-2} \left(\frac{Q_{s,r}}{350} \right)^2 + 3,1551 \left(\frac{n_r}{5000} \right)^2 - 0,1742 \frac{Q_{s,r}}{350} \frac{n_r}{5000} - 2,7501 \left(\frac{Q_{s,r}}{350} \right)^3; \quad (11)$$

$$\eta_{p,n} = 115,0756 - 12,4027 \frac{Q_{s,r}}{350} - 22,9612 \frac{n_r}{5000} + 1,7153 \cdot 10^{-2} \left(\frac{Q_{s,r}}{350} \right)^2 - 2,0801 \left(\frac{n_r}{5000} \right)^2 + 1,8441 \frac{Q_{s,r}}{350} \frac{n_r}{5000} - 7,9649 \cdot 10^{-2} \left(\frac{Q_{s,r}}{350} \right)^3, \quad (12)$$

где значение КПД представлено в %.

Последовательно варьируя значения каждого из измеряемых параметров в окрестности истинного значения, соответствующего рассмотренному выше примеру, и оставляя значения остальных параметров неизменными, будем имитировать таким образом

неисправности ИК. Используя формулы (3) – (8) и (11), (12), рассчитаем значения R_c , η_p и соответствующие нормальные значения. По формулам (9), (10) найдем относительные отклонения δR_c и $\delta \eta_p$.

Из полученных результатов расчетов видно, что в исходной (базовой) точке отклонения $\delta R_c = \delta R_{c.o}$ и $\delta \eta_p = \delta \eta_{p.o}$ не равны нулю. Это обусловлено погрешностью аппроксимации характеристик (1), (2) полиномиальными моделями (11), (12). Поэтому для дальнейшего анализа были использованы отклонения, вычисленные с учетом поправки, равные нулю в базовой точке:

$$\delta R' = \delta R_c - \delta R_{c.o}; \delta \eta'_p = \delta \eta_p - \delta \eta_{p.o}.$$

Анализ результатов расчетов и рис. 2 показывает:

1. Завышение P_s проявляется так же, как и занижение P_d , а занижение P_s – как завышение P_d . Поэтому раздельное распознавание этих неисправностей не представляется возможным, и при дальнейшем анализе их следует объединить.

2. Слабое влияние неисправностей ИК ΔP_o на диагностические признаки подтверждается. Поэтому из дальнейшего анализа эти неисправности следует исключить. Они должны выявляться отдельно по признаку выхода значения расхода рабочего тела или его приведенного значения за пределы рабочего диапазона.

3. Нелинейный характер расчетных формул (3) – (8) проявляется главным образом при возникновении неисправностей ИК T_s , приводящих занижению значений T_s . Соответствующая траектория развития неисправности значительно отклоняется от прямой. Остальные траектории можно считать линейными.

4. Неисправности ИК T_s и T_d в нижней части диагностического пространства (линии 6 и 7) различаются четко.

В верхней части диагностического пространства (линии 1 и 2) различия не столь значительные, по-

этому возможность распознавания зависит от соотношения между степенью развития неисправности и уровнем случайных погрешностей измерений.

Поэтому, прежде чем перейти к формированию алгоритма распознавания, выполним анализ достоверности диагностирования.

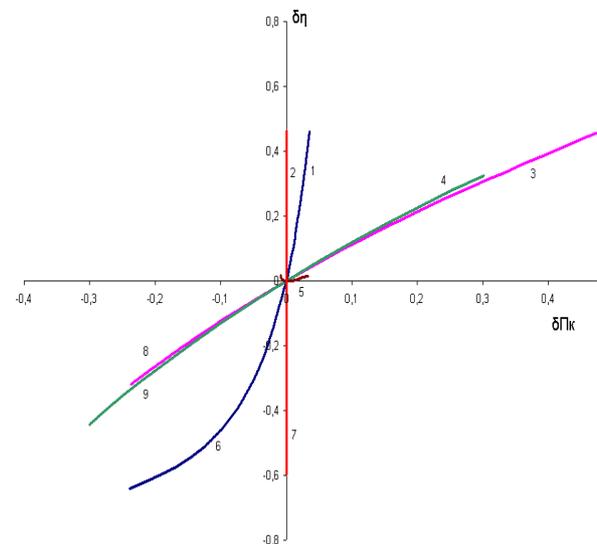


Рис. 2. Траектории неисправностей ИК, полученные в результате нелинейного анализа: 1 – завышение T_s до 5,3%; 2 – занижение T_d до 5%; 3 – занижение P_s до 30%; 4 – завышение P_d до 30%; 5 – завышение и занижение ΔP_o до 30%; 6 – занижение T_s до 30%; 7 – завышение T_d до 25%; 8 – завышение P_s до 30%; 9 – занижение P_d

Анализ достоверности диагностирования

Для анализа достоверности диагностирования воспользуемся методикой, изложенной в работах [4, 5]. Она основана на следующем.

Пусть объект имеет r состояний и m диагностических параметров y_j ($j = 1, \dots, m$), каждое неисправное состояние характеризуется значением одного параметра $\delta \theta_k$ ($k = 1, \dots, r$), который представляет степень развития дефекта, а связь между отклонениями диагностических параметров и параметрами дефектов линейна:

$$\delta \vec{Y} = C \delta \vec{\theta} \quad \text{или} \quad \delta y_j = \sum_{k=1}^r C_{jk} \delta \theta_k, \quad (13)$$

где $C = \{C_{jk}\}$ – матрица коэффициентов влияния.

Погрешности диагностических параметров являются центрированными случайными

величинами, распределенными по нормальному закону со среднеквадратичными отклонениями σ_j .

Рассмотрим m -мерное диагностическое пространство $(\delta y_1, \dots, \delta y_m)$. Тогда, с учетом (13), образы неисправностей могут быть представлены в нем аналогично тому, как это было сделано на рис. 2, лучами Ω_k , выходящими из начала координат. Если ограничить интервалы возможных значений параметров дефектов

$$0 \leq \delta\theta_k \leq \delta\theta_{k.пред} \quad (14)$$

(будем в дальнейшем считать $\delta\theta_k$ положительными, так как это легко обеспечить подбором знаков коэффициентов влияния C_{jk} в модели (13)), то образами дефектов будут отрезки прямых, выходящие из начала координат (рис. 3).

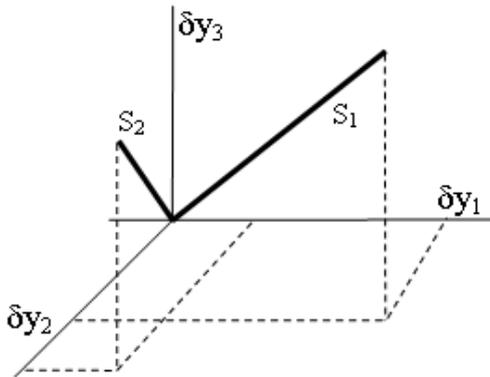


Рис. 3. Траектории состояний S_1 и S_2 в диагностическом пространстве в отсутствие погрешностей измерений

Вследствие проявления погрешностей измерений, полученные в результате измерений значения диагностических признаков будут отличаться от истинных, а образы дефектов примут объемный характер. Если выполнить преобразование координат

$$\delta \bar{y}_j = \frac{\delta y_j}{\sigma_j}, \text{ то в модифицированном диагностическом пространстве области рассеивания диагностических признаков вокруг их истинных значений будут сферическими. Соответствующие образы дефектов представлены на рис. 4.}$$

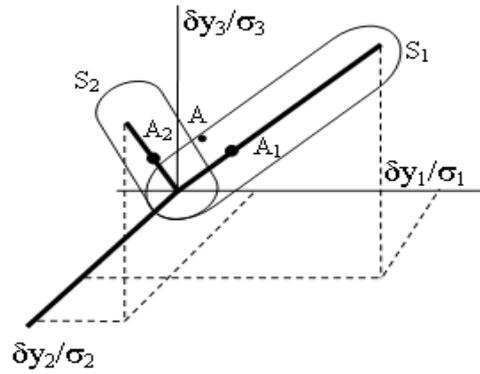


Рис. 4. Образы состояний S_1 и S_2 в модифицированном диагностическом пространстве с учетом погрешностей измерений

Рассмотрим точку A в диагностическом пространстве (рис. 4), полученную как результат наложения случайных погрешностей на истинные значения δy_j^0 , соответствующие неисправности S_1 с параметром развития $\delta\theta_1^0$. Тогда вероятность получения этой точки в результате измерения при состоянии S_1 и истинном значении A_1 равна:

$$P[A/(A_1/S_1)] = P(A_1/S_1)P(A/A_1)$$

или

$$P[\delta \bar{Y}/(\delta \bar{Y}_1^0/S_1)] = P(\delta \bar{Y}/\delta \bar{Y}_1^0)P(\delta \bar{Y}_1^0/S_1), \quad (15)$$

где $P(C/D)$ – условная вероятность события C при условии реализации события D .

Аналогично определим вероятность реализации точки A_2 :

$$P[\delta \bar{Y}/(\delta \bar{Y}_2^0/S_2)] = P(\delta \bar{Y}/\delta \bar{Y}_2^0)P(\delta \bar{Y}_2^0/S_2). \quad (16)$$

В общем случае, формулы (15) и (16) дают ненулевые значения вероятностей. Это создает проблему распознавания неисправностей и требует разработки для ее решения специальных методов.

Каждому состоянию S_k соответствует множество истинных значений $\delta \bar{Y}_k^0$ и точек A_k , расположенных на соответствующем идеальном образе дефекта. Очевидно, чем больше степень развития дефекта, характеризуемая значением $\delta\theta_k^0$, тем дальше точка A_k от начала координат, тем меньше вероятность того, что результат измерения окажется близко к

области, характеризующей другое состояние, и в результате распознавания будет получено ложное решение – при наличии фактического состояния S_q будет принят диагноз D_p о наличии состояния S_p . Поэтому достоверность диагностирования зависит от степени развития неисправности, и делать общие выводы можно только на основании оценки некоторых средних (интегральных) показателей достоверности, характеризующих все возможные случаи реализации истинных значений при наличии соответствующего состояния.

Для характеристики возможности реализации точки А при наличии состояния S_k введем функцию плотности вероятности $f[(A/S_k)] = f(\delta\bar{Y}/S_k)$ и найдем ее связь с функцией $f(\delta\bar{Y}^0/S_j)$ плотности вероятности реализации истинного значения $\delta\bar{Y}^0$ при состоянии S_k и функцией $f(\delta\bar{Y}/\delta\bar{Y}^0)$ плотности вероятности погрешностей измерений:

$$f(A/S_k) = f(\delta\bar{Y}/S_k) = \int_{\Omega_k} f(\delta\bar{Y}/\delta\bar{Y}^0) f(\delta\bar{Y}^0/S_k) dS_k, \tag{17}$$

где Ω_k – область, характеризующая идеальный образ дефекта (отрезок на рис. 3).

Считая распределение погрешностей нормальным с дисперсионной матрицей $D = \text{diag}\{\sigma_1^2 \dots \sigma_m^2\}$ и математическим ожиданием $\delta\bar{Y}^0$, получим:

$$f(\delta\bar{Y}/\delta\bar{Y}^0) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m \sigma_1 \dots \sigma_m}} \times \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta y_1 - y_1^0}{\sigma_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta y_m - y_m^0}{\sigma_m} \right)^2 \right]; \tag{18}$$

$$f(\delta\bar{Y}/S_k) = \frac{1}{\sqrt{\frac{(C_{1k}\delta\theta_k)^2}{\sigma_1^2} + \dots + \frac{(C_{mk}\delta\theta_k)^2}{\sigma_m^2}}} = \frac{1}{\delta\theta_k \sqrt{\left(\frac{C_{1k}}{\sigma_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{C_{mk}}{\sigma_m} \right)^2}}; \tag{19}$$

$$f(\delta\bar{Y}/S_k) = \int_0^{\delta\theta_{k,пред}} \frac{1}{\delta\theta_k \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{jk}}{\sigma_j} \right)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m \sigma_1 \dots \sigma_m}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\delta y_j - C_{jk} \delta\theta_k}{\sigma_j} \right)^2} d(\delta\theta_k). \tag{20}$$

Интеграл (20) можно определять численным методом или с использованием табличных функций.

Полученное выражение (20) может быть положено в основу методики анализа достоверности распознавания неисправностей.

Примеры полученных результатов

Таблица 2
Матрица достоверности при $\sigma = 0,1\%$ и максимальных отклонениях измеряемых параметров 25%

	T1+	T2-	P1-	исправное
T1+	0,4784	0,3287	0,1834	0,0009
T2-	0,3419	0,5466	0,1308	0,0007
P1+	0,1777	0,1227	0,6858	0,0035
исправное	0,002	0,0019	0	0,9949
средняя вероятность правильного распознавания				0,676

Таблица 3
Влияние максимальных отклонений, характерных для дефектов, на достоверность $\sigma = 0,1\%$

ООткл. %	T1+	T2-	P1-	Испр.
25	0,4784	0,5466	0,6858	0,9949
15	0,4786	0,5454	0,6847	0,9918
10	0,4782	0,5462	0,6827	0,9883
0,5	0,4665	0,5385	0,6114	0,8626
0,2	0,4516	0,5264	0,5355	0,7434
0,1	0,4301	0,5092	0,448	0,6176

Выводы

Таким образом, в результате выполненного исследования проблемы диагностирования измерительных систем промышленных компрессоров получены следующие результаты:

1. Выполнен качественный анализ влияния неисправностей измерительной системы (ИС) на результаты расчета параметров рабочего процесса компрессоров. Показано, что существует принципиальная возможность диагностирования ИС.

2. Предложено формировать метод диагностирования измерительной системы на основе принципа избыточности, используя связи между диагностируемыми неисправностями, обусловленные рабочим процессом объекта. Выбрано диагностическое пространство, координатами которого являются отклонения степени повышения давления и поллитропного КПД компрессора от нормальных значений.

3. С помощью моделей, отражающих влияние неисправностей ИС на диагностические параметры получены траектории (образы) развития неисправностей в диагностическом пространстве. Установлено, что влияние большинства неисправностей на диагностические параметры имеет характер, близкий к линейному. Исключение составляет неисправность, обусловленная занижением показаний температуры на входе в компрессор, влияние которой при значительной степени развития нелинейно.

4. Выполнен анализ достоверности распознавания неисправностей ИС.

5. На основе выполненного анализа сформирован алгоритм распознавания неисправностей ИС компрессора.

6. Разработанный алгоритм может быть рекомендован к использованию в подсистеме параметрической диагностики (ППД) газоперекачивающих агрегатов. Для его внедрения в состав универсальных программных средств необходимо:

– дополнить состав базы данных конфигурирования ППД необходимыми параметрами;

– внедрить в состав программного комплекса программный модуль диагностирования ИС компрессора;

– разработать экранные образы индикации неисправностей ИС компрессора;

– разработать методику настройки алгоритма;

– выполнить тестирование алгоритма на модельной и реальной информации.

Литература

1. Urban L.A. Gas path analysis applied to turbine engine condition monitoring. // AIAA Paper. – 1972. – № 1082. – P. 12.

2. Елифанов С.В. Определение единичных неисправностей ВРД с использованием линейных термодинамических моделей // Испытания авиационных двигателей: Межвуз. науч. сб. – Уфа: УАИ, 1979. – Вып. 7. – С. 90-95.

3. Елифанов С.В., Фельдштейн Я.М. Анализ точности определения показателей эффективности показателей газотурбинного привода и нагнетателя по параметрам перекачиваемого газа // Вестник двигателестроения. – 2003. – № 2. – С. 66-69.

4. Елифанов С.В. Диагностический анализ термодинамических параметров ГТД // Методы и средства диагностики газотурбинных двигателей: Сб. науч. тр. – Х.: ХАИ, 1989. – С. 3-28.

5. Елифанов С.В., Лобода И.И. Анализ диагностируемости газотурбинных двигателей параметрическими методами // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. ХАИ за 1994 г. – Х.: ХАИ, 1995. – С. 73-79.

Поступила в редакцию 14.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.