

**ИОИ'2000**

**РАЗДЕЛ 2**  
**Прикладные**  
**интеллектуализированные**  
**системы и модели**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ**

А.В. Адаменко

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники,  
Кафедра прикладной математики  
61166, Украина, Харьков, пр. Ленина 14  
Tevjashev@kture.kharkov.ua

**ABSTRACT**

The effective intellectual system of an evaluation of a technical status of gas turbo-compressor, using formalizable and poorly formalizable procedures is offered. This system includes informational and analytical subsystems and provides: evaluation of actual values of parameters of centrifugal supercharger of gas turbo-compressor on minimal volume of the operative data and on several various modes of operations, evaluation of parameters of a technical status centrifugal supercharger of gas turbo-compressor, forecast of dynamics of change of parameters of a technical status of centrifugal supercharger and calculation of a resource of time up to a stop of gas turbo-compressor.

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема адекватной и оперативной оценки технического состояния центробежных нагнетателей (ЦБН) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) имеет огромное экономическое и техническое значение для сокращения непроизводительных потерь топливного газа и обеспечения надежности и устойчивости технологического процесса транспорта и распределения газа [1]. Известно, что основными причинами ухудшения технического состояния ЦБН являются эрозионный износ проточной части из-за повышенного содержания абразивных веществ в транспортируемом газе и увеличение зазоров между гребнем уплотнения и рабочим колесом ЦБН [1]. Предлагается эффективная интеллектуальная система оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов, использующая формализуемые и слабо формализуемые процедуры. Система реализует метод идентификации технического состояния ЦБН ГПА, описанный в [2]. Метод основан на использовании результатов прямых измерений расхода топливного газа газотурбинной установкой, давлений и температур газа на входе и выходе ЦБН, а также косвенных измерений расхода товарного газа через ЦБН, полученных с использованием "математического расходомера" [3].

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦБН

Основными термодинамическими характеристиками ЦБН являются: зависимости степени сжатия  $\varepsilon$ , политропического коэффициента полезного действия (КПД)  $\eta$  и относительной приведенной внутренней мощности  $\left(\frac{N}{\gamma_H}\right)_{\text{пр}}$  от приведенной объемной производительности  $Q_{\text{пр}}$  и приведенного относительного числа оборотов  $\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр}}$  ( $n_0$  — номинальное число оборотов на ЦБН,  $n$  — обороты привода на ЦБН). Степень сжатия  $\varepsilon\left(Q_{\text{пр}}, \left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр}}\right)$  при  $\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр}} = 1$  представляется в виде многочлена второй степени, а функции  $\eta(Q_{\text{пр}})$  и  $\left(\frac{N}{\gamma_H}\right)_{\text{пр}}$  хорошо приближаются многочленами третьей степени [2]:

$$\varepsilon_0(Q_{\text{пр}}, 1) = a_0 + a_1 Q_{\text{пр}} + a_2 Q_{\text{пр}}^2,$$

$$\eta(Q_{\text{пр}}) = d_0 + d_1 Q_{\text{пр}} + d_2 Q_{\text{пр}}^2 + d_3 Q_{\text{пр}}^3,$$

$$\left(\frac{N}{\gamma_H}\right)_{\text{пр}} = c_0 + c_1 Q_{\text{пр}} + c_2 Q_{\text{пр}}^2 + c_3 Q_{\text{пр}}^3,$$

где  $a_0, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3$  — коэффициенты аппроксимации соответствующих функций.

Известно, что работа ЦБН ГПА может быть описана математической моделью, которая представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений и неравенств [2]:

$$M_{\text{ГПА}} = \left\{ \varepsilon = \left[ 1 + \left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр}}^2 \left( \varepsilon_0^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) \right]^{\frac{m}{m-1}}, \right. \quad (1)$$

$$T_k = T_H \left( \frac{P_k}{P_H} \right)^{\frac{m-1}{m}}, \quad (2)$$

$$q_{\text{т.г.}} = q_{\text{т.г.}}^H \cdot K_q \times \left( 0.75 \frac{N_e}{N_e^H} + 0.25 \sqrt{\frac{t_3 + 273}{t_3^0 + 273}} \cdot \frac{P_a}{1.033} \right), \quad (3)$$

$$Q_{\text{пр. min}} \leq Q_{\text{пр}} \leq Q_{\text{пр. max}}, \quad n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}}, \quad P_k \leq P^{\text{max}}, \quad T_k \leq T^{\text{max}} \}, \quad (4)$$

где  $P_H, P_k$  — давления газа на входе и на выходе ЦБН ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ );  $T_H, T_k$  — температуры газа на входе и на выходе ЦБН (К);  $q$  — коммерческий расход газа на ГПА ( $\text{млн. м}^3/\text{сут}$ );  $q_{\text{т.г.}}$  — расход топливного газа газотурбинной установки (ГТУ) ( $\text{тыс. м}^3/\text{час}$ );  $q_{\text{т.г.}}^H$  — номинальный расход топливного газа ( $\text{тыс. м}^3/\text{час}$ );  $K_q$  — коэффициент, который учитывает изменение расхода топливного газа в зависимости от технического состояния ГТУ;  $N_e$  — фактическая мощность ГТУ (кВт);  $N_e^H$  — номинальная мощность ГТУ (кВт);  $t_3$  — температура воздуха на входе ГТУ ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_3^0$  — некоторый параметр ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P_a$  — атмосферное давление ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ );  $P^{\text{max}}$  — максимальное давление нагнетателя, определяемое прочностью труб ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ );  $T^{\text{max}}$  — ограничение сверху на температуру газа на выходе ЦБН, зависящее

от свойств изоляционного покрытия (К);  $Q_{\text{пр. min}}, Q_{\text{пр. max}}$  — минимально и максимально допустимые значения приведенной объемной производительности ( $\text{м}^3/\text{мин}$ );  $n_{\text{min}}, n_{\text{max}}$  — минимальная и максимальная частота вращения вала нагнетателя ( $\text{об}/\text{мин}$ );

$$\varepsilon = \frac{P_k}{P_H}; \quad \varepsilon_0 = a_0 + a_1 Q_{\text{пр}} + a_2 Q_{\text{пр}}^2;$$

$$m = \frac{k \eta}{k(\eta-1)+1} \text{ — показатель политропы;}$$

$$\eta = d_0 + d_1 Q_{\text{пр}} + d_2 Q_{\text{пр}}^2 + d_3 Q_{\text{пр}}^3;$$

$a_0, a_1, a_2, d_0, d_1, d_2, d_3$  — коэффициенты аппроксимации соответствующих функций;

$$\frac{k}{k-1} = \frac{k_0}{k_0-1} \cdot \left( 1 + \frac{d_{\text{ср}} \cdot k_0 - 1}{R} \right) \cdot \frac{1}{Z_{\text{ср}} \cdot (1 + X \eta)},$$

$k$  — показатель адиабаты;

$$\frac{k_0}{k_0-1} = 5.15 + \frac{(5.65 + 0.017 \cdot t_{\text{ср}}) \Delta}{1.987},$$

$k_0$  — показатель “изоэнтропы” газа в идеальном состоянии;

$$Z_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (Z_H + Z_k) \text{ — средний приведенный коэффициент сжимаемости газа;}$$

$$Z_H = Z(P_H, T_H) \text{ — коэффициент сжимаемости газа на входе ЦБН;}$$

$$Z_k = Z(P_k, T_k) \text{ — коэффициент сжимаемости газа на выходе ЦБН;}$$

$$\Delta = \frac{\rho_H}{1.206} \text{ — относительная плотность газа по воздуху;}$$

$\rho_H$  — плотность сухого газа в нормальном состоянии в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$$Q_{\text{пр}} = \frac{n_0}{n} \gamma_0 \frac{Z_H \cdot R_H \cdot \ln_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}}(T_H)}{P_H} \frac{q}{1440} 10^2;$$

$T_{\text{min}}, T_{\text{max}}$  — минимально и максимально допустимые значения температуры газа (К);  $R_H$  ( $\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ) — газовая постоянная на входе ЦБН;  $\gamma_0$  — удельный вес газа в нормальных условиях ( $\text{кгс}/\text{м}^3$ );

$$Z(P, T) = 1 - \left( \left( \ln_{P_{\text{min}}}^{P_{\text{max}}}(P) - 6 \right) \cdot \left( \frac{0.345 \Delta}{10^2} - \frac{0.446}{10^3} \right) + 0.015 \right) \cdot \left( 1.3 - 0.0144 \left( \ln_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}}(T) - 283.2 \right) \right) \text{ —}$$

коэффициент сжимаемости газа;  $P_{\text{min}}, P_{\text{max}}$  — минимально и максимально допустимые значения давления газа ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ );

$$\ln_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}}(x) = \begin{cases} x, & x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}}, \\ x_{\text{min}}, & x \leq x_{\text{min}}, \\ x_{\text{max}}, & x \geq x_{\text{max}}, \end{cases} \text{ — функция проецирования точки на область;}$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{\text{пр}}^2 = \begin{cases} \frac{Z_{\text{пр}} R_{\text{пр}} T_{\text{пр}}}{Z_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} \cdot \ln_{T_{\text{мин}}}^{T_{\text{макс}}} (T_{\text{н}})} \left(\frac{n}{n_0}\right)^2, \\ \text{если } Z_{\text{н}} \ln_{T_{\text{мин}}}^{T_{\text{макс}}} (T_{\text{н}}) > Z_{\text{мин}} T_{\text{мин}}, \text{ — приведенные обороты ЦБН,} \\ \left(\frac{n}{n_0}\right)^2, \text{ в ост. случаях.} \end{cases}$$

$Z_{\text{пр}}, R_{\text{пр}} \left(\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right), T_{\text{пр}} (\text{К})$  — приведенные значения коэффициента сжимаемости, газовой постоянной и температуры газа;

$Z_{\text{мин}}$  — минимально допустимое значение коэффициента сжимаемости;

$$X = \left( \frac{1.23 + 0.12 P_{\text{пр.ср}}}{T_{\text{пр.ср}}^2} - 0.061 \right) \cdot \frac{P_{\text{пр.ср}}}{T_{\text{пр.ср}} Z_{\text{ср}}} \text{ — коэффициент изобарического сжатия газа;}$$

$$\frac{d_{\text{ср}}}{R} = \frac{P_{\text{пр.ср}} \cdot (2.46 + 0.12 P_{\text{пр.ср}})}{T_{\text{пр.ср}}^3} \text{ — средний приведенный коэффициент теплоемкости газа;}$$

$$P_{\text{пр.ср}} = \frac{1}{2} (P_{\text{пр}}(P_{\text{н}}) + P_{\text{пр}}(P_{\text{к}})) \text{ — среднее приведенное давление;}$$

$$T_{\text{пр.ср}} = \frac{1}{2} (T_{\text{пр}}(T_{\text{н}}) + T_{\text{пр}}(T_{\text{к}})) \text{ — средняя приведенная температура;}$$

$$P_{\text{пр}}(P) = \frac{P + 1.033}{P_{\text{пк}}} \text{ — приведенное давление;}$$

$$T_{\text{пр}}(T) = \frac{T}{T_{\text{пк}}} \text{ — приведенная температура;}$$

$$P_{\text{пк}} = 30.168 \cdot (0.05993 (26.831 - \rho_{\text{н}}) + N_{\text{CO}_2} - 0.392 N_{\text{N}_2}) \text{ — псевдокритическое давление,}$$

$N_{\text{CO}_2}, N_{\text{N}_2}$  — молярные концентрации углекислого газа и азота в транспортируемом газе в долях единицы,

$$T_{\text{пк}} = 88.25 \cdot (1.7591 (0.56364 + \rho_{\text{н}}) - N_{\text{CO}_2} - 1.681 N_{\text{N}_2}) \text{ — псевдокритическая температура;}$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (T_{\text{н}} + T_{\text{к}}) - 273.15 \text{ — среднее значение температуры;}$$

$$q_{\text{т.г.}}^{\text{н}} = \frac{860 \cdot N_{\text{е}}^{\text{н}}}{\eta_{\text{е}}^{\text{н}} \cdot C_{\text{н}} \cdot 10^3};$$

$\eta_{\text{е}}^{\text{н}}$  — номинальный эффективный КПД на муфте ГТУ,  $C_{\text{н}}$  — нижняя теплота сгорания топливного газа в  $\text{кДж}/\text{м}^3$  при  $293 \text{ }^\circ\text{К}$  и  $1.033 \text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $C_{\text{н}} = 35600 \text{ кДж}/\text{м}^3$ ).

$$N_{\text{е}} = \left(\frac{N}{\gamma_{\text{н}}}\right)_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \cdot \gamma_{\text{н}} + N_{\text{мех}},$$

где  $N_{\text{мех}}$  — механические потери на валу привода (кВт). Для ГТУ  $N_{\text{мех}} = 100 \text{ кВт}$ ;

$$\gamma_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{Z_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} \cdot T_{\text{н}} \cdot 9.8} 10^5 \text{ — удельный вес газа перед ЦБН (кгс}/\text{м}^3),$$

$$\left(\frac{N}{\gamma_{\text{н}}}\right)_{\text{пр}} = c_0 + c_1 Q_{\text{пр}} + c_2 Q_{\text{пр}}^2 + c_3 Q_{\text{пр}}^3,$$

$t_3 = t_a + \delta_t + \delta_{\text{п}} - \delta_{\text{во}}$  — температура воздуха на входе ГТУ ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$t_a$  — расчетная температура атмосферного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\delta_t$  — поправка на изменчивость климатологических данных ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\delta_{\text{п}}$  — поправка на местный подогрев воздуха на входе ГТУ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\delta_{\text{во}}$  — поправка, которая учитывается в летнее время при работе водяного охлаждения ( $^{\circ}\text{C}$ ).

В процессе эксплуатации ГПА его характеристики могут меняться, что приводит к необходимости идентификации коэффициентов аппроксимации в характеристиках ГПА.

## ФУНКЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Система оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов, включающая в себя две системы: информационную и аналитическую, обеспечивает:

- оценивание фактических значений параметров ЦБН ГПА по минимальному объему оперативных данных. Задача оценивания фактических значений  $\hat{a}_{0\Phi}$ ,  $\hat{d}_{0\Phi}$ ,  $\hat{c}_{0\Phi}$  параметров ГПА  $a_0$ ,  $d_0$ ,  $c_0$  по минимальному объему оперативных данных сводится к решению системы уравнений и неравенств модели ЦБН (1)—(4) относительно неизвестных параметров  $a_0$ ,  $d_0$ ,  $c_0$ . Остальные все параметры и переменные модели ЦБН считаются известными. Эту систему можно решить в алгебраическом смысле и получить решение в явном виде [2];
- оценивание фактических значений параметров ЦБН ГПА по нескольким различным режимам работы ЦБН. Неизвестными (оцениваемыми) также являются параметры модели ЦБН  $a_0$ ,  $d_0$ ,  $c_0$ . Система уравнений и неравенств модели ЦБН (1)—(4) совместно с наборами измеренных данных будет переопределенной. Поэтому ее решение можно найти только в статистическом смысле. Задача оценивания фактических значений  $\hat{a}_{0\Phi}$ ,  $\hat{d}_{0\Phi}$ ,  $\hat{c}_{0\Phi}$  параметров ГПА  $a_0$ ,  $d_0$ ,  $c_0$  по нескольким режимам работы ЦБН сводится к задаче условной минимизации функции, которая представляет собой сумму квадратов отклонений переменных модели ЦБН — давлений, температур, расходов товарного и топливного газа, относительного числа оборотов — от их измеренных значений:

$$\sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{\text{ни}} - P_{\text{ни}})^2}{\sigma_{P_{\text{ни}}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{\text{ки}} - P_{\text{ки}})^2}{\sigma_{P_{\text{ки}}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{\text{ни}} - T_{\text{ни}})^2}{\sigma_{T_{\text{ни}}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{\text{ки}} - T_{\text{ки}})^2}{\sigma_{T_{\text{ки}}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_i - q_i)^2}{\sigma_{q_i}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_{\text{т.г.}i} - q_{\text{т.г.}i})^2}{\sigma_{q_{\text{т.г.}i}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{\left( \binom{\tilde{n}}{n_0}_i - \binom{n}{n_0}_i \right)^2}{\sigma_{n_i}^2} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$P_{\text{ни}}, P_{\text{ки}}, T_{\text{ни}}, T_{\text{ки}}, q_i, q_{\text{т.г.}i}, \binom{n}{n_0}_i, a_0, d_0, c_0 \in \Omega$

где  $\tilde{P}_{\text{ни}}$ ,  $\tilde{P}_{\text{ки}}$ ,  $\tilde{T}_{\text{ни}}$ ,  $\tilde{T}_{\text{ки}}$ ,  $\tilde{q}_i$ ,  $\tilde{q}_{\text{т.г.}i}$ ,  $\binom{\tilde{n}}{n_0}_i$  — наборы измеренных значений переменных модели ЦБН в нескольких режимах;  $\sigma_{P_{\text{ни}}}^2$ ,  $\sigma_{P_{\text{ки}}}^2$ ,  $\sigma_{T_{\text{ни}}}^2$ ,  $\sigma_{T_{\text{ки}}}^2$ ,  $\sigma_{n_i}^2$  — дисперсии ошибок измерений,  $i = 1, \dots, K_r$ .

При этом область ограничений  $\Omega$  описывается уравнениями и неравенствами модели ЦБН (1)—(4), повторенными  $K_r$  раз ( $K_r$  — количество режимов работы ЦБН), т.е.:

$$\bigcup_{i=1}^{K_r} \left( M_{\text{ГПА}} \mid P_{\text{н}} = P_{\text{ни}}, P_{\text{к}} = P_{\text{ки}}, T_{\text{н}} = T_{\text{ни}}, T_{\text{к}} = T_{\text{ки}}, q = q_i, q_{\text{т.г.}} = q_{\text{т.г.}i}, n = n_i \right). \quad (6)$$

Задача (5)—(6) решается методами математического программирования: модифициро-

ванных функций Лагранжа, штрафных функций. Получаемые оценки параметров являются асимптотически состоятельными, несмещенными и эффективными;

- оценивание показателей технического состояния ЦБН ГПА— коэффициентов, учитывающих “сдвиг” фактических газодинамических характеристик ЦБН относительно его паспортных характеристик. В качестве показателей технического состояния ЦБН используются следующие коэффициенты, учитывающие “сдвиг” приведенных характеристик ЦБН:

—по степени сжатия:  $K_\varepsilon = \frac{\hat{a}_{0\Phi}}{\hat{a}_{0\Pi}}$ ,

—по политропическому КПД:  $K_\eta = \frac{\hat{d}_{0\Phi}}{\hat{d}_{0\Pi}}$ ,

—по внутренней относительной мощности:  $K_N = \frac{\hat{c}_{0\Phi}}{\hat{c}_{0\Pi}}$ .

Индексы  $\Pi$  и  $\Phi$  означают, что соответствующие оценки относятся к паспортным—  $\Pi$ , или фактическим—  $\Phi$ , характеристикам ЦБН;

- построение более адекватной модели ЦБН ГПА для дальнейшего ее использования при решении задач технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов;
- прогноз динамики изменения показателей технического состояния ЦБН;
- вычисление ресурса времени до остановки ГПА и проведение ППР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается эффективная интеллектуальная система оценки технического состояния ГПА, использующая формализуемые и слабо формализуемые процедуры. Эта система включает в себя две системы: информационную и аналитическую и обеспечивает: оценивание фактических значений параметров ЦБН ГПА по минимальному объему оперативных данных и по нескольким различным режимам работы ЦБН, оценивание показателей технического состояния ЦБН ГПА, прогноз динамики изменения показателей технического состояния ЦБН и вычисление ресурса времени до остановки ГПА и проведение ППР. Результаты решения задач оценки технического состояния ГПА подтвердили высокую эффективность разработанной системы и возможность ее использования в системах технической диагностики реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поршаков Б.П., Лопатин А.С., Назарьина А.М., Рябченко А.С. Повышение эффективности эксплуатации энергопривода компрессорных станций.— М.: “Недра”, 1992.— 207 с.
2. Адаменко В.А., Адаменко А.В., Тевяшева О.А. Идентификация технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов// Радиоэлектроника и информатика.— 1999.— №3.— С. 24—30.
3. Тевяшев А.Д., Козыренко С.И. Применение “математических расходомеров” в задачах контроля параметров технологических процессов// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики.— Санкт-Петербург, 1997.— С. 318—332.