

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

АДАМЕНКОВ А., АДАМЕНКО А. В., ТЕВЯШЕВА О. А.

Предлагается эффективный метод идентификации технического состояния центробежных нагнетателей (ЦБН) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с газотурбинным приводом, основанный на использовании результатов прямых измерений расхода топливного газа газотурбинной установкой (ГТУ), давлений и температур газа на входе и выходе ЦБН, а также косвенных измерений расхода товарного газа через ЦБН, полученных с использованием “математического расходомера”.

1. Введение

Проблема адекватной и оперативной оценки технического состояния ЦБН ГПА имеет огромное экономическое и техническое значение для сокращения непроизводительных потерь топливного газа и обеспечения надежности и устойчивости технологического процесса транспорта и распределения газа [1–3]. Несмотря на многочисленные попытки, эффективных решений этой проблемы не существует. Это связано, в первую очередь, с тем, что методы, применяемые до настоящего времени, достаточно трудоемки и требуют для своей реализации результатов специально спланированных и проведенных натуральных экспериментов с использованием первичных датчиков высокого класса точности. В данной работе предлагается эффективный метод решения указанной проблемы с использованием штатного набора измерительных средств для измерения параметров газовых потоков, а также результатов косвенных измерений расхода товарного газа через ЦБН с использованием “математического расходомера” [4]. Основная идея математического расходомера заключается в эффективном использовании результатов всех проводимых в газотранспортной сети измерений мгновенных значений расходов, давлений и температур газа на газораспределительных станциях и замерных пунктах и “приведения” всех этих измерений к расходам на конкретных ГПА компрессорных станций. Каждое косвенное измерение расхода газа математическим расходомером сопровождается оценкой дисперсии этого расхода [4]. С формальной точки зрения полученное значение измеренного расхода товарного газа через ЦБН ГПА практически ничем не отличается от результатов прямых измерений давлений и температур газовых потоков на входах и выходах ЦБН. Недостатком предлагаемого метода необходимо признать то, что он может быть использован только в комплексе с математическим расходомером.

2. Термодинамическая модель ЦБН

Согласно [5], основными термодинамическими характеристиками ЦБН являются: зависимости сте-

пени сжатия $\varepsilon = \frac{P_k}{P_n}$, политропического коэффициента полезного действия η и относительной приведенной внутренней мощности $\left(\frac{N}{\gamma_n}\right)_{пр}$ от приведенной объемной производительности $Q_{пр}$ ($\text{м}^3/\text{мин}$) и приведенного относительного числа оборотов $\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр}$, где P_n, P_k — давление газа на входе и выходе ЦБН ($\text{кгс}/\text{см}^2$); n_0 — номинальное число оборотов на ЦБН (об/мин); n — обороты привода на ЦБН (об/мин). Степень сжатия $\varepsilon\left(Q_{пр}, \left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр}\right)$ при $\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр} = 1$ можно представить в виде многочлена второй степени [6]:

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

Функции $\eta(Q_{пр})$ и $\left(\frac{N}{\gamma_n}\right)_{пр}(Q_{пр})$ хорошо приближаются многочленами третьей степени [6]:

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

$$\left(\frac{N}{\gamma_n}\right)_{пр}(Q_{пр}) = c_0 + c_1 Q_{пр} + c_2 Q_{пр}^2 + c_3 Q_{пр}^3. \quad (3)$$

Формулы приведения имеют вид [6]:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{Z_{пр} R_{пр} T_{пр}}{Z_n R_n T_n}},$$

$$\left(\frac{N}{\gamma_n}\right)_{пр} = \left(\frac{n_0}{n}\right)^3 \frac{N}{\gamma_n}, \quad (4)$$

$$Q_{пр} = \frac{n_0}{n} \gamma_0 \frac{Z_n R_n T_n}{P_n \cdot 10^4} \frac{q \cdot 10^6}{1440},$$

где $Z_{пр}, R_{пр}$ ($\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$), $T_{пр}$ (К) — приведенные значения коэффициента сжимаемости, газовой постоянной и температуры газа; Z_n, R_n ($\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$), T_n (К) — коэффициент сжимаемости газа, газовая постоянная и температура на входе ЦБН; γ_n — удельный вес газа перед ЦБН ($\text{кгс}/\text{м}^3$); N — внутренняя мощность, потребляемая ЦБН (кВт); q — коммерческий расход газа на ГПА (млн. $\text{м}^3/\text{сут}$), γ_0 — удельный вес газа в нормальных условиях ($\text{кгс}/\text{м}^3$).

В выражениях (1)–(3) $a_0, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3$ — коэффициенты аппроксимации соответствующих функций.

Таким образом, основными термодинамическими характеристиками ЦБН являются приведенные характеристики (1)-(3).

Формула для пересчета $\varepsilon \left(Q_{пр}, \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр} \right)$ при изменении числа оборотов на ЦБН и физических параметров газа имеет вид [6]

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

где m — показатель политропы.

В [6] показано, что когда степень сжатия $\varepsilon \leq 1.3$, а показатель политропы близок к реальным значениям, можно практически без потери точности воспользоваться более простой и приближенной формулой:

$$\varepsilon = 1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2 (\varepsilon_0 - 1). \quad (5)$$

Важной характеристикой течения газа в нагнетателе является также температура. Абсолютная температура газа на выходе нагнетателя T_k (К) определяется через температуру на его входе T_H (К) [6]:

$$T_k = T_H \varepsilon^{\frac{m-1}{m}}. \quad (6)$$

При идентификации технического состояния ЦБН необходимо учитывать технологические ограничения, которые задаются в виде следующих неравенств:

$$Q_{пр. \min} \leq Q_{пр} \leq Q_{пр. \max}, \quad (7)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (8)$$

$$P_k \leq P^{\max}, \quad T_k \leq T^{\max}, \quad (9)$$

где $Q_{пр. \min}$, $Q_{пр. \max}$ — минимально и максимально допустимые значения приведенной объемной производительности ($\text{м}^3/\text{мин}$); n_{\min} , n_{\max} — минимальная и максимальная частота вращения вала нагнетателя (об/мин); P^{\max} — максимальное давление нагнетателя, определяемое прочностью труб ($\text{кгс}/\text{см}^2$); T^{\max} — ограничение сверху на температуру газа на выходе ЦБН, зависящее от свойств изоляционного покрытия (К).

Наиболее широкое применение для привода ЦБН получили газотурбинные установки, которые используют газовое топливо [2]. Поэтому в модель ЦБН целесообразно включить зависимость расхода топливного газа $q_{т.г.}$ (тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$) газотурбинной установки [2]:

$$q_{т.г.} = q_{т.г.}^H \cdot K_q \times \left(0.75 \frac{N_e}{N_e^H} + 0.25 \sqrt{\frac{t_3 + 273}{t_3^0 + 273}} \cdot \frac{P_a}{1.033} \right), \quad (10)$$

где $q_{т.г.}^H$ — номинальный расход топливного газа (тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$); 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 ($\text{кгс}/\text{см}^2$).

Для постановки и решения задачи идентификации технического состояния ЦБН в качестве основных уравнений и неравенств модели ЦБН будем использовать выражения (5)–(10). В целях расширения области изменения переменных модели ЦБН, обеспечения монотонности зависимости по каждой из этих переменных, повышения устойчивости модели и обеспечения условий ее разрешимости эти уравнения и неравенства необходимо модифицировать таким образом, чтобы в области изменения реальных значений переменных модели ее исходные и модифицированные уравнения и неравенства совпадали. Модифицированную систему уравнений и неравенств (5)–(10) модели ЦБН представим в виде:

$$M_{ГПА} = \{$$

$$\varepsilon = 1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2 (\varepsilon_0 - 1), \quad (11)$$

$$T_k = T_H \left(\frac{P_k}{P_H} \right)^{\frac{m-1}{m}}, \quad (12)$$

$$q_{т.г.} = q_{т.г.}^H \cdot K_q \times \left(0.75 \frac{N_e}{N_e^H} + 0.25 \sqrt{\frac{t_3 + 273}{t_3^0 + 273}} \cdot \frac{P_a}{1.033} \right), \quad (13)$$

$$Q_{пр. \min} \leq Q_{пр} \leq Q_{пр. \max}, \quad (14)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (15)$$

$$P_k \leq P^{\max}, \quad T_k \leq T^{\max}, \quad (16)$$

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

$$m = \frac{k \eta}{k(\eta - 1) + 1}; \quad \eta = d_0 + d_1 Q_{пр} + d_2 Q_{пр}^2 + d_3 Q_{пр}^3;$$

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

k — показатель адиабаты;

$$\frac{k_0}{k_0-1} = 5.15 + \frac{(5.65 + 0.017 \cdot t_{cp}) d_B}{1.987},$$

k_0 — показатель “изоэнтропии” газа в идеальном состоянии;

$$Z_{cp} = \frac{1}{2} (Z_H + Z_k) —$$

средний приведенный коэффициент сжатия газа;

$$Z_H = Z(P_H, T_H) -$$

коэффициент сжимаемости газа на входе ЦБН;

$$Z_k = Z(P_k, T_k) -$$

коэффициент сжимаемости газа на выходе ЦБН;

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

T_{min}, T_{max} — минимально и максимально допустимые значения температуры газа (К);

$$Z(P, T) = 1 -$$

$$\left[\left(\ln_{P_{min}}^{P_{max}}(P) - 6 \right) \cdot \left(\frac{0.345 \Delta}{10^2} - \frac{0.446}{10^3} \right) + 0.015 \right] \times \\ \times \left(1.3 - 0.0144 \left(\ln_{T_{min}}^{T_{max}}(T) - 283.2 \right) \right) -$$

коэффициент сжимаемости газа, Δ — относительная плотность газа по воздуху; P_{min}, P_{max} — минимально и максимально допустимые значения давления газа (кгс/см²);

$$\ln_{x_{min}}^{x_{max}}(x) = \begin{cases} x, & x_{min} < x < x_{max}, \\ x_{min}, & x \leq x_{min}, \\ x_{max}, & x \geq x_{max}, \end{cases} -$$

функция проецирования точки на область;

$$\left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2 = \begin{cases} \frac{Z_{пр} R_{пр} T_{пр}}{Z_H \cdot R_H \cdot \ln_{T_{min}}^{T_{max}}(T_H)} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2, \\ \text{если } Z_H \ln_{T_{min}}^{T_{max}}(T_H) > Z_{min} T_{min}, \\ \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 & \text{в остальных случаях} \end{cases} -$$

приведенные обороты ЦБН, Z_{min} — минимально допустимое значение коэффициента сжимаемости;

$d_v = \frac{P_H}{1.206}$ — плотность газа по воздуху; ρ_H — плотность сухого газа в нормальном состоянии в кг/м³;

$$X = \left(\frac{1.23 + 0.12 P_{пр.пр}}{T_{пр.пр}^2} - 0.61 \right) \cdot \frac{P_{пр.пр}}{T_{пр.пр} Z_{ср}} -$$

коэффициент изобарического сжатия газа;

$$\frac{d_{ср}}{R} = \frac{P_{пр.пр} \cdot (2.46 + 0.12 P_{пр.пр})}{T_{пр.пр}^3} -$$

средний приведенный коэффициент теплоемкости

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

давление; $T_{пр.ср} = \frac{1}{2}(T_{пр.н} + T_{пр.к})$ — средняя приве-

денная температура; $P_{пр.н} = \frac{P_H + 1.033}{P_{пк}}$ — приведенное

давление на входе нагнетателя; $P_{пр.к} = \frac{P_k + 1.033}{P_{пк}}$ — приведенное давление на выходе нагнетателя;

$T_{пр.н} = \frac{T_H}{T_{пк}}$ — приведенная температура на входе на-

гнетателя; $T_{пр.к} = \frac{T_k}{T_{пк}}$ — приведенная температура на выходе нагнетателя;

$$P_{пк} = 30.618 \times$$

$$\times (0.05993(26.831 - \rho_H) + N_{CO_2} - 0.392 N_{N_2}) -$$

псевдокритическое давление, N_{CO_2}, N_{N_2} — молярные концентрации углекислого газа и азота в транспортируемом газе в долях единицы,

$$T_{пк} = 88.25 \times$$

$$\times (1.7591(0.56364 + \rho_H) - N_{CO_2} - 1.681 N_{N_2}) -$$

псевдокритическая температура;

$t_{ср} = \frac{1}{2}(T_H + T_k) - 273.15$ — среднее значение темпера-

туры; $q_{т.г.}^H = \frac{860 \cdot N_e^H}{\eta_e^H \cdot C_H \cdot 10^3}$; η_e^H — номинальный эф-

фективный КПД на муфте ГТУ, C_H — нижняя теплота сгорания топливного газа в кДж/м³ при 293К и 1.033 кгс/см² ($C_H = 35600$ кДж/м³),

$$N_e = N + N_{мех}, \quad (17)$$

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

С учетом (4) выражение (17) примет вид:

$$N_e = \left(\frac{N}{\gamma_H} \right)_{пр} \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \cdot \gamma_H + N_{мех},$$

где $\gamma_H = \frac{P_H}{Z_H \cdot R_H \cdot T_H \cdot 9.8} 10^5$,

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

$t_3 = t_a + \delta_t + \delta_n - \delta_{во}$ — температура воздуха на входе ГТУ (°С); t_a — расчетная температура атмосферного воздуха (°С) (определяется по климатологическим справочникам); δ_t — поправка на изменчивость климатологических данных (°С) (для средней температуры месяца принимается $\delta_t = 2.5$ °С, года и сезона $\delta_t = 1.5$ °С); δ_n — поправка на местный подогрев воздуха на входе ГТУ (°С) ($\delta_n = 2.5$ °С); $\delta_{во}$ — поправка, которая учитывается в летнее время при работе водяного охлаждения (°С) ($\delta_{во} = 6 - 10$ °С).

Все переменные, входящие в модель ЦБН, можно условно поделить на два класса: переменные модели ЦБН и параметры модели ЦБН. Переменные модели ЦБН могут быть различными для разных режимов работы ЦБН, а параметры обычно не меняются при изменении режима работы ЦБН. Таким образом, переменные модели ЦБН меняются более быстро по сравнению с параметрами.

В качестве переменных модели ЦБН принимаем: $P_H, P_k, T_H, T_k, q, q_{т.г.}, \frac{n}{n_0}$. При этом параметрами модели ЦБН будут: $k_0, \rho_H, N_{N_2}, N_{CO_2}, \gamma_0, Z_{пр}, T_{пр}, R_{пр}, R_H, \Delta, Q_{пр.min}, Q_{пр.max}, n_{min}, n_{max}, p^{max}, T^{max}, Z_{min}, T_{min}, T_{max}, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3, \eta_e^H, C_H, K_q, N_e^H, P_a, t_a, \delta_t, \delta_{II}, \delta_{во}, t_3^0$. Параметрами-функциями модели ЦБН являются: $m, \eta, k, d_v, P_{пк}, T_{пк}, q_{т.г.}^H, t_3$.

3. Содержательная постановка задачи идентификации технического состояния ЦБН

Известно, что основными причинами ухудшения технического состояния ЦБН являются эрозийный износ проточной части из-за повышенного содержания абразивных веществ в транспортируемом газе и увеличение зазоров между гребнем уплотнения и рабочим колесом ЦБН [1]. В связи с этим в термодинамическую модель ЦБН необходимо ввести ряд коэффициентов, учитывающих “сдвиг” фактических газодинамических характеристик ЦБН относительно его паспортных характеристик. Результаты исследований, приведенные в [1], позволили оценить влияние этих факторов на “форму” сдвига: приведенные характеристики ЦБН, находящегося длительное время в эксплуатации, смещаются практически параллельно паспортным характеристикам. Это позволяет использовать в качестве показателей технического состояния ЦБН следующие коэффициенты, учитывающие “сдвиг” приведенных характеристик ЦБН:

— по степени сжатия:

$$K_\epsilon = \frac{\hat{a}_{0\Phi}}{\hat{a}_{0\Pi}}, \quad (18)$$

— по политропическому КПД:

$$K_\eta = \frac{\hat{d}_{0\Phi}}{\hat{d}_{0\Pi}}, \quad (19)$$

— по внутренней относительной мощности:

$$K_N = \frac{\hat{c}_{0\Phi}}{\hat{c}_{0\Pi}}, \quad (20)$$

Индексы Π и Φ в выражениях (18)—(20) означают, что соответствующие оценки относятся к паспортным — Π , или фактическим — Φ характеристикам ЦБН. Так как оценки коэффициентов паспортных характеристик $\hat{a}_{0\Pi}, \hat{d}_{0\Pi}, \hat{c}_{0\Pi}$ известны априорно, то задача идентификации технического состояния ЦБН практически сводится к оцениванию фактических значений $\hat{a}_{0\Phi}, \hat{d}_{0\Phi}, \hat{c}_{0\Phi}$ трех коэффициентов a_0, d_0, c_0 .

4. Оценивание фактических значений $\hat{a}_{0\Phi}, \hat{d}_{0\Phi}, \hat{c}_{0\Phi}$ параметров a_0, d_0, c_0 по минимальному объему оперативных данных

Задача оценивания указанных параметров ЦБН по минимальному объему оперативных данных сводится к решению системы уравнений и неравенств модели ЦБН (11)—(16) относительно неизвестных

параметров a_0, d_0, c_0 . Остальные параметры и переменные модели ЦБН считаются известными. В этом случае систему (11)—(16) можно решить в алгебраическом смысле и получить решение в явном виде:

$$a_0 = 1 - Q_{пр} \cdot (a_1 + a_2 Q_{пр}) + \left(\frac{P_k}{P_H} - 1 \right) / \left(\frac{n}{n_0} \right)_{пр}^2, \quad (21)$$

$$d_0 = \left[- \left(\frac{d_{Cp}}{R} (k_0 - 1) + k_0 \right) \ln \left(\frac{T_k}{T_H} \right) Q_{пр} \times \right. \\ \left. \times (d_1 + Q_{пр} (d_2 + d_3 Q_{пр})) + (k_0 - 1) \ln \left(\frac{P_k}{P_H} \right) \times \right. \\ \left. \times (1 + Q_{пр} (d_1 + Q_{пр} (d_2 + d_3 Q_{пр}))) X Z_{cp} \right] / \\ \left[\left(\frac{d_{Cp}}{R} (k_0 - 1) + k_0 \right) \ln \left(\frac{T_k}{T_H} \right) - (k_0 - 1) \ln \left(\frac{P_k}{P_H} \right) X Z_{cp} \right], \quad (22)$$

$$c_0 = \frac{1}{K_q n^3 q_{т.г.}^H \gamma_H} (n^3 (1.333 \cdot N_e^H \cdot q_{т.г.} - \\ - K_q N_{мех} q_{т.г.}^H - 0.322685 K_q N_e^H P_a q_{т.г.}^H \sqrt{\frac{t_3 + 273}{t_3^0 + 273}}) - \\ - K_q n^3 q_{т.г.}^H Q_{пр} (c_1 + Q_{пр} (c_2 + c_3 Q_{пр})) \cdot \gamma_H). \quad (23)$$

Для получения фактических оценок $\hat{a}_{0\Phi}, \hat{d}_{0\Phi}, \hat{c}_{0\Phi}$ параметров a_0, d_0, c_0 достаточно в выражения (21)—(23) вместо неизвестных переменных $P_H, P_k, T_H, T_k, q, q_{т.г.}, \frac{n}{n_0}$ подставить их измеренные значения $\tilde{P}_H, \tilde{P}_k, \tilde{T}_H, \tilde{T}_k, \tilde{q}, \tilde{q}_{т.г.}, \frac{\tilde{n}}{n_0}$. После получения оценок параметров a_0, d_0, c_0 проверяются условия (14)—(16). Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то считается, что задача оценивания параметров a_0, d_0, c_0 не имеет решения из-за ошибок в исходных данных.

Полученные оценки параметров могут вычисляться в реальном масштабе времени с использованием штатных средств измерения и позволяют анализировать динамику изменения технического состояния ЦБН. Однако с теоретической точки зрения эти оценки являются достаточно грубыми, смещенными и неэффективными. Для обеспечения несмещенности и эффективности получаемых оценок необходимо использовать дополнительные наборы измеряемых переменных, полученных на различных режимах работы ЦБН.

5. Оценивание фактических значений $\hat{a}_{0\Phi}, \hat{d}_{0\Phi}, \hat{c}_{0\Phi}$ параметров a_0, d_0, c_0 по нескольким различным режимам работы ЦБН

Рассмотрим теперь более общий случай. Пусть известны наборы измеренных данных для нескольких режимов работы ЦБН. Неизвестными (оцениваемыми) являются, как и ранее, параметры модели ЦБН a_0, d_0, c_0 . В этом случае система уравнений

и неравенств модели ЦБН (11)—(16) совместно с наборами измеренных данных будет переопределенной. Поэтому ее решение можно найти только в статистическом смысле.

Пусть имеются наборы измеренных значений переменных модели ЦБН в нескольких режимах:

$$\tilde{P}_{ni}, \tilde{P}_{ki}, \tilde{T}_{ni}, \tilde{T}_{ki}, \tilde{q}_i, \tilde{q}_{т.г.i}, \left(\frac{\tilde{n}}{n_0}\right)_i, \quad i = 1, \dots, K_r,$$

где K_r — количество режимов работы ЦБН.

Измеренные значения давлений, температур, расходов товарного и топливного газа, относительного числа оборотов представим в виде:

$$\tilde{P}_{ni} = P_{ni}^{ист} + \xi_{P_{ni}}, \quad \tilde{P}_{ki} = P_{ki}^{ист} + \xi_{P_{ki}}, \quad (24)$$

$$\tilde{T}_{ni} = T_{ni}^{ист} + \xi_{T_{ni}}, \quad \tilde{T}_{ki} = T_{ki}^{ист} + \xi_{T_{ki}}, \quad (25)$$

$$\tilde{q}_i = q_i^{ист} + \xi_{q_i}, \quad \tilde{q}_{т.г.i} = q_{т.г.i}^{ист} + \xi_{q_{т.г.i}}, \quad (26)$$

$$\left(\frac{\tilde{n}}{n_0}\right)_i = \left(\frac{n}{n_0}\right)_i^{ист} + \xi_{n_i}, \quad i = 1, \dots, K_r, \quad (27)$$

где $P_{ni}^{ист}$, $P_{ki}^{ист}$, $T_{ni}^{ист}$, $T_{ki}^{ист}$, $q_i^{ист}$, $q_{т.г.i}^{ист}$, $\left(\frac{\tilde{n}}{n_0}\right)_i^{ист}$ —

истинные значения давлений, температур, расходов товарного и топливного газа, относительного числа оборотов, а $\xi_{P_{ni}}$, $\xi_{P_{ki}}$, $\xi_{T_{ni}}$, $\xi_{T_{ki}}$, ξ_{q_i} , $\xi_{q_{т.г.i}}$, ξ_{n_i} — ошибки измерений соответствующих переменных.

Предполагается, что ошибки измерений являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными дисперсиями, т.е.

$$\xi_{P_{ni}} \sim N(0, \sigma_{P_{ni}}^2), \quad \xi_{P_{ki}} \sim N(0, \sigma_{P_{ki}}^2),$$

$$\xi_{T_{ni}} \sim N(0, \sigma_{T_{ni}}^2), \quad \xi_{T_{ki}} \sim N(0, \sigma_{T_{ki}}^2),$$

$$\xi_{q_i} \sim N(0, \sigma_{q_i}^2), \quad \xi_{q_{т.г.i}} \sim N(0, \sigma_{q_{т.г.i}}^2),$$

$$\xi_{n_i} \sim N(0, \sigma_{n_i}^2), \quad i = 1, \dots, K_r.$$

Принято полагать, что ошибки измерений давлений, температур, расходов товарного и топливного газа, относительных оборотов статистически независимы друг от друга [7]. В этом случае совместная функция плотности распределения ошибок будет равна произведению функций плотности распределения ошибок переменных модели. Функция максимального правдоподобия с учетом статистических свойств ошибок переменных модели ЦБН и с учетом выражений (24)—(27) примет вид:

$$F = (2\pi)^{-\frac{K_r}{2}} \cdot \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{P_{ni}}^{-1} \cdot \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{P_{ki}}^{-1} \cdot \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{T_{ni}}^{-1} \times \\ \times \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{T_{ki}}^{-1} \cdot \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{q_i}^{-1} \cdot \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{q_{т.г.i}}^{-1} \times \\ \times \prod_{i=1, \dots, K_r} \sigma_{n_i}^{-1} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ni} - P_{ni})^2}{\sigma_{P_{ni}}^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ki} - P_{ki})^2}{\sigma_{P_{ki}}^2}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ni} - T_{ni})^2}{\sigma_{T_{ni}}^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ki} - T_{ki})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_i - q_i)^2}{\sigma_{q_i}^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_{т.г.i} - q_{т.г.i})^2}{\sigma_{q_{т.г.i}}^2}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{\left(\left(\frac{\tilde{n}}{n_0}\right)_i - \left(\frac{n}{n_0}\right)_i\right)^2}{\sigma_{n_i}^2}\right). \quad (28)$$

Прологарифмируем выражение (28) и получим логарифмическую функцию максимального правдоподобия:

$$\ln F = -\frac{K_r}{2} \ln(2\pi) - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{P_{ni}} - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{P_{ki}} - \\ - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{T_{ni}} - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{T_{ki}} - \\ - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{q_i} - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{q_{т.г.i}} - \prod_{i=1, \dots, K_r} \ln \sigma_{n_i} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ni} - P_{ni})^2}{\sigma_{P_{ni}}^2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ki} - P_{ki})^2}{\sigma_{P_{ki}}^2} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ni} - T_{ni})^2}{\sigma_{T_{ni}}^2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ki} - T_{ki})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_i - q_i)^2}{\sigma_{q_i}^2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_{т.г.i} - q_{т.г.i})^2}{\sigma_{q_{т.г.i}}^2} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{K_r} \frac{\left(\left(\frac{\tilde{n}}{n_0}\right)_i - \left(\frac{n}{n_0}\right)_i\right)^2}{\sigma_{n_i}^2}.$$

Функции F и $\ln F$ достигают экстремума при одних и тех же значениях аргументов (следствие монотонно возрастающего характера функции $\ln F$), что позволяет формулировать исходную задачу как задачу максимизации функции $\ln F$ или как задачу минимизации функции $(-\ln F)$. В этом случае задача оценивания фактических параметров модели ЦБН принимает вид:

$$\sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ni} - P_{ni})^2}{\sigma_{P_{ni}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{P}_{ki} - P_{ki})^2}{\sigma_{P_{ki}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ni} - T_{ni})^2}{\sigma_{T_{ni}}^2} + \\ + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{T}_{ki} - T_{ki})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_i - q_i)^2}{\sigma_{q_i}^2} + \sum_{i=1}^{K_r} \frac{(\tilde{q}_{т.г.i} - q_{т.г.i})^2}{\sigma_{q_{т.г.i}}^2} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{K_r} \frac{\left(\left(\frac{\tilde{n}}{n_0} \right)_i - \left(\frac{n}{n_0} \right)_i \right)^2}{\sigma_{n_i}^2} \rightarrow \min$$

$$P_{ni}, P_{ki}, T_{ni}, T_{ki}, q_i, q_{T.r.i}, \left(\frac{n}{n_0} \right)_i, a_0, d_0, c_0 \in \Omega, \quad (29)$$

где область ограничений Ω описывается уравнениями и неравенствами модели ЦБН (11)–(16), повторными K_r раз, т.е.

$$\Omega: \bigcup_{i=1}^{K_r} \left(M_{ГПА} \left| \begin{array}{l} P_n = P_{ni}, P_k = P_{ki}, T_n = T_{ni}, T_k = T_{ki}, \\ q = q_i, q_{T.r.} = q_{T.r.i}, n = n_i \end{array} \right. \right). \quad (30)$$

(29)–(30) является задачей условной минимизации, которую можно решать методами математического программирования (например, методом модифицированных функций Лагранжа, штрафных функций [8]) и др.

Результаты решения задачи (29)–(30) $\hat{a}_{0Ф}$, $\hat{d}_{0Ф}$, $\hat{c}_{0Ф}$ принимаются в качестве фактических оценок параметров a_0 , d_0 , c_0 , которые являются асимптотически состоятельными, несмещенными и эффективными [6].

6. Пример решения задачи идентификации технического состояния ЦБН ГПА

Приведем результаты решения задачи идентификации технического состояния ЦБН 235-21-1 ГПА с ГТУ типа ГТК-10 для экспериментальных данных одного режима работы ЦБН.

При решении задачи идентификации технического состояния ЦБН были использованы следующие значения измеренных переменных:

$$\tilde{P}_n = 54.92 \text{ кгс/см}^2, \tilde{P}_k = 75.09 \text{ кгс/см}^2,$$

$$\tilde{T}_n = 297.88 \text{ К}, \tilde{T}_k = 310.2 \text{ К}, \tilde{q} = 14.96 \text{ млн. м}^3/\text{сут},$$

$$\tilde{q}_{T.r.} = 0.615 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}, \frac{\tilde{n}}{n_0} = \frac{4250}{4800}.$$

Параметры модели ЦБН были приняты следующие: $Q_{\min} = 150 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\max} = 300 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Z_{\min} = 10^{-10}$,

$$\Delta = 0.6, R_{пр} = 50 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, R_n = 49 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, T_{пр} = 288 \text{ К},$$

$$Z_{пр} = 0.91, \gamma_0 = 0.705111 \text{ кгс/м}^3, T_{гр} = 278 \text{ К},$$

$$\rho_n = 0.7236 \text{ кг/м}^3, N_{CO_2} = 0.003, N_{N_2} = 0.044,$$

$$a_1 = 0.00354067, a_2 = -0.000011277, d_1 = -0.0105261,$$

$$d_2 = 0.0000622818, d_3 = -1.16767 \cdot 10^{-7}, c_1 = 0.8478,$$

$$c_2 = 2.2464 \cdot 10^{-3}, c_3 = -9.591 \cdot 10^{-6}, N_e^H = 10000 \text{ кВт},$$

$$N_{мех} = 100 \text{ кВт}, C_n = 35600 \text{ кДж/м}^3, \eta_e^H = 0.29,$$

$$K_q = 1.03, P_a = 1.002 \text{ кгс/см}^2, t_3 = 7.2 \text{ }^\circ\text{С}, t_3^0 = 15 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Паспортные значения оценок параметров a_0 , d_0 , c_0 следующие: $\hat{a}_{0П} = 1.2188$, $\hat{d}_{0П} = 1.3938$, $\hat{c}_{0П} = 29.98$.

Фактические оценки параметров a_0 , d_0 , c_0 , полученные в соответствии с выражениями (21)–(23), равны: $\hat{a}_{0Ф} = 1.20855$, $\hat{d}_{0Ф} = 1.38047$, $\hat{c}_{0Ф} = 36.4149$.

Зависимости $\varepsilon_0(Q_{пр})$, коэффициента полезного действия от приведенной объемной производительности $\eta(Q_{пр})$ и относительной приведенной внутренней мощности ЦБН от приведенной объемной производительности $\left(\frac{N}{\gamma} \right)_{пр} (Q_{пр})$ для паспортных и фактических значений параметров a_0 , d_0 , c_0 приведены на рис. 1, 2, 3 соответственно.

На рис. 1–3 сплошной линией показаны зависимости $\varepsilon_0(Q_{пр})$, $\eta(Q_{пр})$ и $\left(\frac{N}{\gamma} \right)_{пр} (Q_{пр})$ для паспортных

оценок $\hat{a}_{0П}$, $\hat{d}_{0П}$, $\hat{c}_{0П}$ параметров a_0 , d_0 , c_0 , а пунктирной линией — те же зависимости для фактических оценок $\hat{a}_{0Ф}$, $\hat{d}_{0Ф}$, $\hat{c}_{0Ф}$ этих параметров.

Коэффициенты технического состояния исследуемого ЦБН соответственно равны: $K_\varepsilon = 0.9916$, $K_\eta = 0.9914$, $K_N = 1.21464$.

Полученные результаты позволили построить более адекватную модель ЦБН для дальнейшего ее использования при решении задач идентификации технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов.

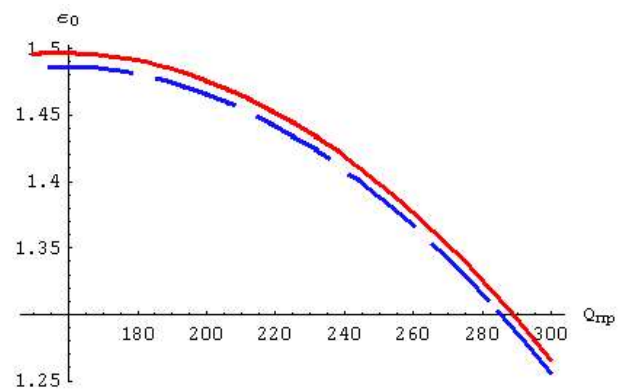


Рис. 1. Зависимость ε_0 от приведенной объемной производительности

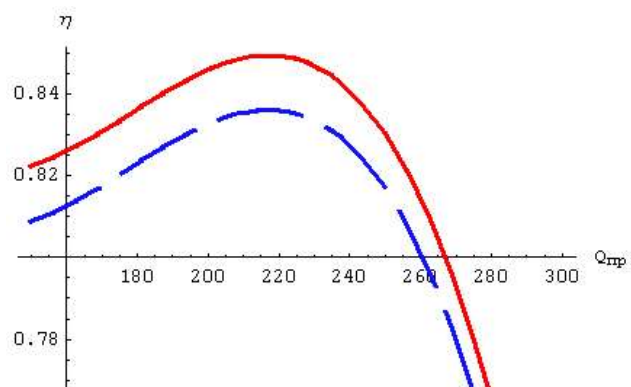


Рис. 2. Зависимость к.п.д. от приведенной объемной производительности

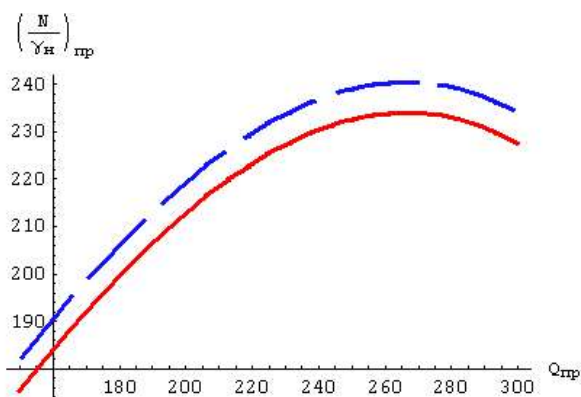


Рис. 3. Зависимость относительной приведенной внутренней мощности ЦБН от приведенной объемной производительности

7. Заключение

Предложен метод идентификации технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Приведена модифицированная термодинамическая модель ЦБН с расширенной областью допустимых решений, обеспечивающая непрерывность и монотонность зависимостей по каждой из переменных модели; приведена постановка задачи идентификации технического состояния ЦБН по минимальному и полному объему оперативных данных. Приведены результаты решения задачи идентификации технического состояния ЦБН 235-21-1 ГПА с ГТУ типа ГТК-10, подтверждающие возможность использования предлагаемого метода 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. 207с. 2. Довідник експлуатаційників газонафтового комплексу// В.В. Розгонюк, Л.А. Хачикян, М.А. Григіль, О.С. Удалов, В.П. Нікішин. К.: Росток, 1998. 432с. 3. Ионин Д.А., Яковлев Е.И. Современные методы

диагностики магистральных газопроводов. М.: Недра, 1987. 232с. 4. 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. 5. Альбом характеристик центробежных нагнетателей природного газа. М.: Министерство газовой промышленности СССР, 1985. 86 с. 6. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Х.: Вища шк., 1980. 144с. 7. Тевяшев А., Козыренко С., Адаменко А.. Статистически устойчивая идентификация состояния модели стационарного режима транспорта газа в магистральном газопроводе // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. Львів: Державний університет "Львівська політехніка". 1998. С. 48-57. 8. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.

Поступила в редколлегию 15.09.99

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Евдокимов А.Г.

Адаменко Вера Анатольевна, канд. техн. наук, ассистент кафедры прикладной математики ХТУРЭ. Научные интересы: системный анализ, математическое моделирование, компьютерная графика, методы оптимизации, численные методы, математическое программирование. Увлечения и хобби: спортивный бридж, настольный теннис, компьютерные игры, плавание. Адрес: Украина, 310166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. (0572) 40-94-36.

Адаменко Андрей Викторович, научный сотрудник кафедры прикладной математики ХТУРЭ. Научные интересы: системный анализ, математическое моделирование, компьютерная графика, методы оптимизации, численные методы, математическое программирование. Увлечения и хобби: спортивный бридж, настольный теннис, компьютерные игры, шахматы. Адрес: Украина, 310166, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. (0572) 40-94-36.

Тевяшева Ольга Андреевна, студентка 5 курса ХГПУ. Научные интересы: системный анализ и теория оптимальных решений. Увлечения и хобби: горные лыжи, туризм, музыка. Адрес: Украина, 310176, Харьков, ул. Белозаводская, 38, кв.38, тел. (0572) 11-26-73.

УДК 658.012

ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ТЕКУЩЕГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

ТИМОФЕЕВ В.А.

Предлагается рекуррентная модификация алгоритма ТРА, основанная на МНК, для задачи оценивания параметров линейной регрессионной модели.

1. Введение

Если идентифицируемый объект может быть представлен линейной по параметрам регрессионной моделью вида

$$y_n = c^{*T} x_n + \xi_n, \quad (1)$$

то для оценки его параметров c^* целесообразно использовать алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов (МНК). В (1) $y_n \in R^1$ — выходной сигнал объекта; $c^* \in R^n$ — вектор искомых

параметров; $x_n \in R^n$ — вектор входных сигналов;

$\xi_n \in R^1$ — помеха измерения выходного сигнала;

$n = 0, 1, 2, \dots$ — дискретное время.

Оценки МНК, полученные после поступления информации об n измерениях сигналов x и u при $n = N$, имеют вид

$$c_n = (X_n^T X_n)^{-1} X_n^T Y_n. \quad (2)$$

Здесь $Y_n = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ — вектор $n \times 1$;

$$X_n = \begin{pmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ \dots \\ x_n^T \end{pmatrix} \text{ — матрица } n \times N.$$

Как известно, необходимость обращения матрицы наблюдений на каждом шаге процесса идентификации создаёт ряд неудобств при использовании этой оценки. Поэтому более предпочтительной оказывается оценка, получаемая с помощью рекуррентного