ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В.А. 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 productivity centrifugal supercharger of gas turbo-compressor in real time using formalizable and poorly formalizable procedures is offered. This system includes informational and analytical subsystems and provides evaluation of productivity centrifugal supercharger of gas turbo-compressor, checking of a degree of adequacy of the entrance data and adequacy of model of centrifugal supercharger of gas turbo-compressor. In a case model is not adequate the system provides automatic transition to a task of identification of parameters of model of centrifugal supercharger of gas turbo-compressor.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема идентификации расхода транспортируемого газа является наиболее важной и актуальной в газовой промышленности [1]. Предлагается эффективная интеллектуальная система оценки производительности центробежных нагнетателей (ЦБН) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в реальном времени, использующая формализуемые и слабо формализуемые процедуры. Система реализует метод идентификации фактической производительности ЦБН ГПА в реальном времени, описанный в [2]. Метод является эффективным за счет того, что использует все имеющиеся результаты измерений переменных, характеризующих состав и состояние газа и состояние ГПА; учитывает погрешности средств измерений; обеспечивает возможность дополнительной проверки степени адекватности входных данных и адекватности модели ГПА.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦБН

Известно, что работа ЦБН ГПА может быть описана математической моделью, которая представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений и неравенств [3]:

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

$$T_k = T_н\left(\frac{P_k}{P_н}\right)^{\frac{m-1}{m}}, \tag{2}$$

$$Q_{пр.\min} \le Q_{пр} \le Q_{пр.\max},\ n_{\min} \le n \le n_{\max},\ P_k \le P^{\max},\ T_k \le T^{\max}\ \}, \tag{3}$$

где $P_н$, P_k — давления газа на входе и на выходе ЦБН ($кгс/см^2$); $T_н$, T_k — температуры газа на входе и на выходе ЦБН (К); q— коммерческий расход газа на ГПА (млн. $м^3/сут$);

P^{max} — максимальное давление нагнетателя, определяемое прочностью труб ($кгс/см^2$); T^{max} — ограничение сверху на температуру газа на выходе ЦБН, зависящее от свойств изоляционного покрытия (К);

$\varepsilon = \frac{P_k}{P_н}$ — степень сжатия;

$\varepsilon_0 = a_0 + a_1 Q_{пр} + a_2 Q_{пр}{}^2$ — степень сжатия при $\left(\frac{n}{n_0}\right)_{пр} = 1$;

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

$\eta = d_0 + d_1 Q_{пр} + d_2 Q_{пр}{}^2 + d_3 Q_{пр}{}^3$ — политропический коэффициент полезного действия;

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

$$\frac{k}{k-1} = \frac{k_0}{k_0 - 1} \cdot \left(1 + \frac{d_{Cp}}{R} \cdot \frac{k_0 - 1}{k_0}\right) \cdot \frac{1}{Z_{cp} \cdot (1 + X\,\eta)}, \quad (4)$$

k— показатель адиабаты;

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

k_0 — показатель “изоэнтропы” газа в идеальном состоянии;

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

$Z_н = Z(P_н, T_н)$ — коэффициент сжимаемости газа на входе ЦБН;

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

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

$\rho_н$ — плотность сухого газа в нормальном состоянии в $кг/м^3$;

$Q_{пр} = \frac{n_0}{n}\gamma_0 \frac{Z_н \cdot R_н \cdot In_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н)}{P_н} \frac{q}{1440} 10^2$ — приведенная объемная производительность ($м^3/мин$),

T_{min}, T_{max} — минимально и максимально допустимые значения температуры газа (К); $Q_{пр.min}$, $Q_{пр.max}$ — минимально и максимально допустимые значения приведенной объемной производительности ($м^3/мин$); $R_н$ ($\frac{кгс \cdot м}{кг \cdot K}$)— газовая постоянная на входе ЦБН; γ_0 — удельный вес газа в нормальных условиях ($кгс/м^3$); n_0 — номинальное число оборотов на ЦБН ($об/мин$), n— обороты привода на ЦБН ($об/мин$); n_{min}, n_{max} — минимальная и максимальная частота вращения вала нагнетателя ($об/мин$);

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

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

$$In_{x_{min}}^{x_{max}}(x) = \begin{cases} x,\ x_{min} < x < x_{max}, \\ x_{min},\ x \le x_{min}, \\ x_{max},\ x \ge x_{max}, \end{cases}$$ — функция проецирования точки на область;

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^2_{пр} = \begin{cases} \dfrac{Z_{пр} R_{пр} T_{пр}}{Z_н \cdot R_н \cdot \mathrm{In}_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н)} \left(\dfrac{n}{n_0}\right)^2, \\ \text{если } Z_н \mathrm{In}_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н) > Z_{min} T_{min}, \text{— приведенные обороты ЦБН,} \\ \left(\dfrac{n}{n_0}\right)^2, \text{ в ост. случаях.} \end{cases}$$

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

Z_{min} — минимально допустимое значение коэффициента сжимаемости;

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

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

$$P_{пр.ср} = \frac{1}{2}\left(P_{пр}(P_н) + P_{пр}(P_k)\right)$$ — среднее приведенное давление;

$$T_{пр.ср} = \frac{1}{2}\left(T_{пр}(T_н) + T_{пр}(T_k)\right)$$ — средняя приведенная температура;

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

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

$$P_{пк} = 30.168 \cdot \left(0.05993\,(26.831 - \rho_н) + N_{CO_2} - 0.392\, N_{N_2}\right)$$ — псевдокритическое давление,

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

$$T_{пк} = 88.25 \cdot \left(1.7591\,(0.56364 + \rho_н) - N_{CO_2} - 1.681\, N_{N_2}\right)$$ — псевдокритическая температура;

$$t_{ср} = \frac{1}{2}(T_н + T_k) - 273.15$$ — среднее значение температуры.

ФУНКЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦБН ГПА

Система оценки производительности центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, включающая в себя две системы: информационную и аналитическую, обеспечивает:

- оценивание производительности ЦБН ГПА. Задача оценивания производительности ЦБН ГПА сводится к решению системы уравнений и неравенств модели ЦБН (1)—(3) относительно неизвестной переменной q. Остальные все переменные модели ЦБН считаются известными. Система уравнений и неравенств модели ЦБН совместно с наборами измеренных данных будет переопределенной. Поэтому ее решение можно найти только в статистическом смысле. В [2] показано, что задача оценивания производительности ЦБН ГПА сводится к задаче условной минимизации вида:

$$\frac{\left(\widetilde{P}_н - P_н\right)^2}{\sigma^2_{P_н}} + \frac{\left(\widetilde{P}_k - P_k\right)^2}{\sigma^2_{P_k}} + \frac{\left(\widetilde{T}_н - T_н\right)^2}{\sigma^2_{T_н}} + \frac{\left(\widetilde{T}_k - T_k\right)^2}{\sigma^2_{T_k}} + \frac{(\widetilde{n} - n)^2}{\sigma^2_n} \xrightarrow[P_н, P_k, T_н, T_k, n, q \in \Omega]{} \min, \quad (5)$$

где область ограничений Ω описывается уравнениями и неравенствами модели ЦБН (1)—(3).

В выражении (5) $\widetilde{P}_н$, $\widetilde{P}_k$, $\widetilde{T}_н$, $\widetilde{T}_k$, $\widetilde{n}$ — наборы измеренных значений давлений, температур и числа оборотов на ЦБН; $\sigma^2_{P_н}$, $\sigma^2_{P_k}$, $\sigma^2_{T_н}$, $\sigma^2_{T_k}$, σ^2_n — дисперсии ошибок измерений.

Задача (5) является задачей условной минимизации, решение которой осуществляется одним из следующих способов:

1) методами математического программирования: модифицированных функций Лагранжа, штрафных функций [4];

2) специально разработанным методом, учитывающим специфику решаемой задачи. Этот метод основан на переходе от задачи условной минимизации к задаче безусловной минимизации, который можно осуществить, если выразить переменную P_k из уравнения (1), а переменную T_k из уравнения (2) и подставить полученные аналитические выражения в (5). Но найти аналитические выражения для P_k и T_k в явном виде нельзя. Однако, если пренебречь зависимостями показателя адиабаты k от переменных P_k, T_k в выражениях (1)—(2), то тогда можно получить аналитические выражения для P_k из уравнения (1) и для T_k из уравнения (2). С учетом вышесказанного, специальный алгоритм решения задачи условной минимизации вида (5) состоит в следующем.

Задаются начальные приближения по переменным $P_н$, $T_н$, n, равные их измеренным значениям ($P_н^{(0)} = \widetilde{P}_н$, $T_н^{(0)} = \widetilde{T}_н$, $n^{(0)} = \widetilde{n}$), задается начальное приближение по переменной q ($q^{(0)}$) и вычисляется значение для показателя адиабаты k ($k^{(0)}$) по формуле (4) с учетом значений $P_н^{(0)}$, $T_н^{(0)}$, $n^{(0)}$, $\widetilde{P}_k$, $\widetilde{T}_k$.

i-ая итерация алгоритма решения задачи условной минимизации состоит в следующем ($i = \overline{1, КИ}$, где КИ— количество итераций):

1. Находятся аналитические выражения для P_k из уравнения (1) и для T_k из уравнения (2) в предположении, что показатель адиабаты k является постоянной величиной (значение для k получается на предыдущей итерации: $k = k^{(i-1)}$).

2. Найденные аналитические выражения для P_k и T_k подставляются в функцию цели (5), и таким образом, ограничения на равенство (1)—(2) исключаются, и, соответственно, исключаются переменные P_k, T_k. В результате получается задача безусловной минимизации (ограничения на неравенства (3) при решении задачи безусловной минимизации не учитываются, их необходимо проверить после решения задачи). Переменными полученной задачи безусловной минимизации являются: $P_н$, $T_н$, n, q.

3. Решение задачи безусловной минимизации осуществляется известными методами безусловной минимизации: квазиньютоновскими, наискорейшего спуска, градиентным с дроблением шага, сопряженных градиентов [5]. Начальным приближением для решения этой задачи является решение задачи безусловной минимизации, полученное на предыдущей итерации: $P_н^{(i-1)}$, $T_н^{(i-1)}$, $q^{(i-1)}$, $n^{(i-1)}$. Пусть решением задачи безусловной минимизации является: $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$.

4. По аналитическим выражениям, полученным в п.1, и с учетом значений $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$, вычисляются значения для P_k, T_k: $P_k^{(i)}$, $T_k^{(i)}$.

5. По найденным значениям $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$, $P_k^{(i)}$, $T_k^{(i)}$ вычисляется значение для показателя адиабаты k по формуле (4): $k^{(i)}$.

6. Проверяется критерий выхода из условной минимизации. Если он не выполняется— осуществляется переход к п.1. Если он выполняется, то итерационный процесс завершен.

Таким образом, решение задачи условной минимизации вида (5) сводится к решению последовательности задач безусловной минимизации. При этом пренебрегаются зависимости показателя адиабаты k от переменных P_k, T_k в выражениях (1)—(2) на каждой итерации, т.е. показатель адиабаты k считается равным константе на каждой итерации (значение его на каждой итерации берется из предыдущей итерации). Такой подход является вполне обоснованным, поскольку показатель адиабаты k слабо зависит от P_k, T_k.При решении реальных практических задач оценки производительности ЦБН ГПА описанный выше итерационный процесс очень быстро сходится, и, таким образом, разработанный метод решения задачи вида (5) является более эффективным по сравнению с известными методами математического программирования за счет того, что учитывает специфику решаемой задачи;

- проверку степени адекватности входных данных и адекватности модели ЦБН ГПА. Если статистические свойства оценок производительности превышают некоторые установленные пороги, т.е.

  если хотя бы одно из условий

  $$\left|P_н^* - \widetilde{P}_н\right| \le \delta_{max}^{(P_н)},\ \left|P_k^* - \widetilde{P}_k\right| \le \delta_{max}^{(P_k)},\ \left|T_н^* - \widetilde{T}_н\right| \le \delta_{max}^{(T_н)},\ \left|T_k^* - \widetilde{T}_k\right| \le \delta_{max}^{(T_k)},\ \left|n^* - \widetilde{n}\right| \le \delta_{max}^{(n)},$$

  где $P_н^*$, P_k^*, $T_н^*$, T_k^*, n^*, q^*— решение задачи (5); $\delta_{max}^{(P_н)}$, $\delta_{max}^{(P_k)}$, $\delta_{max}^{(T_н)}$, $\delta_{max}^{(T_k)}$, $\delta_{max}^{(n)}$— максимальные погрешности измерений начального давления, конечного давления, начальной температуры, конечной температуры, числа оборотов соответственно,

  не выполняется, то тогда возможны два варианта: либо были ошибки в процессе передачи измерений параметров на вход предлагаемого алгоритма или другие ошибки, которые привели к неадекватности входных данных (тогда нужно проверить правильность ввода исходных данных и, в случае ошибки, попытаться заново решить задачу); либо модель ЦБН ГПА не является адекватной, т.е. присутствуют ошибки модели, и, возможно, некоторые параметры модели нуждаются в корректировке. В этом случае система оценки производительности ЦБН ГПА обеспечивает автоматический переход к задаче идентификации параметров модели ЦБН ГПА [3].

С помощью разработанной интеллектуальной системы было решено много практических задач оценки производительности ЦБН ГПА, что подтвердило высокую ее эффективность и возможность использования в системах технической диагностики реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается эффективная интеллектуальная система оценки производительности ЦБН ГПА в реальном времени, использующая формализуемые и слабо формализуемые процедуры. Эта система включает в себя две системы: информационную и аналитическую и обеспечивает: оценивание производительности ЦБН ГПА, проверку степени адекватности входных данных и адекватности модели ЦБН ГПА. Кроме того, в случае неадекватности модели, система обеспечивает автоматический переход к задаче идентификации параметров модели ЦБН ГПА. С помощью разработанной интеллектуальной системы было решено много практических задач оценки производительности ЦБН ГПА, результаты решения которых подтвердили высокую ее эффективность и возможность использования в системах технической диагностики реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишко Г. Г., Енин П. М. Учет расхода газа.— К.: Урожай, 1993.— 333 с.
2. Адаменко В.А., Адаменко А.В., Тевяшева О.А. Идентификация производительности центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов в реальном времени// Радиоэлектроника и информатика.— 1999.— №4.— С. 39—43.
3. Адаменко В.А., Адаменко А.В., Тевяшева О.А. Идентификация технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов// Радиоэлектроника и информатика.— 1999.— №3.— С. 24—30.
4. Д. Бертсекас. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа.— М.: “Радио и связь”, 1987.— 400 с.
5. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации.— М.: Наука, 1986.— 328 с.