

УДК 681.3.06+681.518.54:621.51

А. А. Прищепо^{*}, канд. техн. наук

В. Б. Измалков^{**}

^{*} ДК «Укртрансгаз» (г. Киев,)

^{**} НПЦ «Техдиагаз» ДК «Укртрансгаз»
(г. Харьков, izmalkov@itransgaz.com)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Проанализировано влияние потерь давления и температур газа на входе и выходе компрессорного цеха. На основе статистических методов по информации диспетчерских журналов и систем автоматического управления компрессорного цеха и газоперекачивающих агрегатов оценочно определены потери давления и температур газа.

Проаналізовано вплив втрат тиску та температур газу на вході та виході компресорного цеху. На основі статистичних методів за інформацією диспетчерських журналів та систем автоматичного керування компресорного цеху і газоперекачувальних агрегатів оцінювально визначено втрати тиску та температур газу.

Введение

В настоящее время единой системой сбора информации о режимах работы компрессорного цеха (КЦ) газотранспортной системы (ГТС) Украины является программный комплекс (ПК) «Эксперт». Поскольку системы автоматического управления (САУ) газоперекачивающими агрегатами (ГПА) стоят не на каждом агрегате и получение с них информации является труднодоступным процессом, были разработаны специальные методы оценки функционально-технического состояния (ФТС) ГПА, на основе цеховых данных, предоставляемых ПК «Эксперт» [1–4]. На основе знаний ФТС каждого ГПА и определяются показатели эффективности работы агрегата (коммерческая производительность, мощность, КПД, степень сжатия, приведенная объемная производительность). Однако следует отметить неточность информации при определении этих показателей, обусловленную потерями давлений и температур газа на входе и выходе компрессорной станции (КС). Анализ влияния и определение этих потерь является актуальной задачей.

Результаты исследований

Исходная информация (приведена в технической системе в том виде, как снимается с приборов на КС) и результаты исследования влияния потерь давлений и температур газа на показатели эффективности работы ГПА, выполненные для нескольких типов ГПА (различные двигатели, центробежные насосы (ЦБН) (полноприводные и нет)) по трем наборам данных, характеризующим положение рабочей точки на характеристике (начало, середина, конец), представлены в табл. 1–4. В табл. 2, 4 q_{pr} , η , N , Q_{com} обозначены соответственно: приведенная объемная производительность ГПА, политропный КПД, мощность, коммерческая производительность; dq_{pr} , $d\eta$, dN , dQ_{com} – отклонения в процентах от начального значения перечисленных ранее величин.

Анализ данных, представленных в табл. 1–4, показывает, что влияние потерь энергии на показатели эффективности работы оборудования ГТС существенно. Поэтому требуется определение этих потерь для задач эффективного управления и планирования транспортом газа.

Таблица 1. Исходные данные для проведения расчетов (тип двигателя НЦ 6.3-125/2.2)

Параметр	Набор 1	Набор 2	Набор 3
Давление газа на входе в нагнетатель p_1 , кгс/см ²	69	60	57,1
Давление газа на входе в нагнетатель p_2 , кгс/см ²	140	150	150
Температура газа на входе в нагнетатель t_1 , °С	30	30	30
Температура газа на выходе из нагнетателя t_2 , °С	103	120.5	127
Частота вращения нагнетателя n , об/мин	8200	8200	8200
Атмосферное давление p_a , мм рт. ст.	746	746	746

Таблица 2. Влияние потерь группы параметров на показатели эффективности работы ЦБН

Параметры					Расчетные значения							
Набор №	p_1 , кгс/см ²	p_2 , кгс/см ²	t_1 , °С	t_2 , °С	q_{pr} , м ³ /мин	dq_{pr} , %	η	$d\eta$, %	N , кВт	dN , %	Q_{com} , млн. м ³ /сут	dQ_{com} , %
1	-0,3	0,3	-0,3	0,3	62,65	-0,72	0,742	3,2	7812	-3,18	6,57	-1,64
2					48,15	-3,12	0,798	2,57	6428	-5,29	4,33	-4,13
3					36,46	-10,8	0,781	1,79	5033	-12,29	3,12	-11,4

Таблица 3. Исходные данные для проведения расчетов (ЦБН RF-2BB -30/76 – cooper)

Параметр	Набор 1	Набор 2	Набор 3
Давление газа на входе в нагнетатель p_1 , кгс/см ²	59	47,5	51,9
Давление газа на входе в нагнетатель p_2 , кгс/см ²	72	68.8	71,9
Температура газа на входе в нагнетатель t_1 , °С	27	22.2	27
Температура газа на выходе из нагнетателя t_2 , °С	49	52.5	56
Частота вращения нагнетателя n , об/мин	5790	6311	5790
Атмосферное давление p_a , мм рт. ст.	764	751	764

Таблица 4. Влияние потерь группы параметров на показатели эффективности работы ЦБН

Параметры					Расчетные значения							
Набор №	p_1 , кгс/см ²	p_2 , кгс/см ²	t_1 , °С	t_2 , °С	q_{pr} , м ³ /мин	dq_{pr} , %	η	$d\eta$, %	N , кВт	dN , %	Q_{com} , млн. м ³ /сут	dQ_{com} , %
1	-0,3	0,3	-0,3	0,3	290,9	-1,3	0,659	9,7	8188	-6,6	23,37	-2
2					201,5	-6,7	0,94	6,57	6455	-10,76	14,27	-7,51
3					1,391	0,94	174,2	-13,4	0,856	6,7	5404	-13,6

Определение потерь давлений и температур

При определении потерь давлений и температур (векторов смещений относительно цеховых данных) используются следующие критерии:

Первый критерий. Вероятность определения режимных параметров НК нагнетателей по вектору измерений параметров агрегатной и цеховой автоматики \bar{Y}_i и расчетному множеству векторов смещений $\{S_{k,c,i}\}$, удовлетворяющих требованиям технической документации на нагнетатели, должна быть максимальной.

Техническая документация на нагнетатель регламентирует требования по величинам приведенной степени сжатия и политропного КПД нагнетателя в функции от приведенной объемной производительности и величины их возможного изменения в процессе эксплуатации, а также регламентирует возможный диапазон изменения этой производительности. Кроме того, могут регламентироваться требования по диапазону изменения этой производительности, коммерческой производительности нагнетателя.

Математические модели каналов измерения агрегатных и цеховых автоматик могут быть представлены в следующем виде:

$$Y_{k,i} = X_{k,i}^f + \delta X_k^s + \delta X_{k,i}^r, \quad Y_{cehi} = X_{cehi}^f + \delta X_{cehi}^s + \delta X_{cehi}^r,$$

где $X_{k,i}^f$ – фактические значения параметров нагнетателя $X_{k,i}^f = \{P_{\text{вх}k,i}^f, T_{\text{вх}k,i}^f, P_{\text{вых}k,i}^f, T_{\text{вых}k,i}^f\}$; X_{cehi}^f – фактические значения параметров КЦ $X_{cehi}^f = \{P_{\text{вх}i}^f, T_{\text{вх}i}^f, P_{\text{вых}i}^f, T_{\text{вых}i}^f, \rho_i, Pa_i\}$; δX_k^s – вектор систематических погрешностей каналов измерения k -го нагнетателя; δX_{cehi}^s – вектор систематических погрешностей каналов измерения КЦ; δX_k^r – вектор случайных погрешностей каналов измерения k -го нагнетателя; δX_{cehi}^r – вектор случайных погрешностей каналов измерения КЦ соответственно.

Систематические погрешности каналов измерения постоянны на время проведения серии измерений. Математические ожидания случайных погрешностей равны нулю. Закон распределения значений всех систематических погрешностей равномерный, случайных – нормальный.

Вектор измерений $Y_{k,i}$ совместно с вектором смещения $S_{k,c,i}$ содержат информацию для вычисления значений приведенной объемной производительности $\varepsilon_{\text{пр}k,i} = \varepsilon_{\text{пр}}(Y_{k,i}, S_{k,j,i})$, полнотропного КПД $\eta_{\text{пол}k,i} = \eta_{\text{пол}k,i}(Y_{k,i}, S_{k,j,i})$ для всех NK нагнетателей. Решая систему уравнений для каждого обобщенного вида дефекта [2] и всех нагнетателей

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{пр}}(\bar{Y}_{k,i}, \bar{S}_{k,j,i}) = \varepsilon_{\text{пр}}(Q_{\text{пр}k,i,j}, D_{k,i,j}) \\ \eta_{\text{пол}}(\bar{Y}_{k,i}, \bar{S}_{k,j,i}) = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{пр}k,i,j}, D_{k,i,j}) \end{cases}, \quad (1)$$

определяется пара значений $Q_{\text{пр}k,i,j}(Y_i)$ и $D_{k,i,j}(Y_i)$ для каждого j -го обобщенного вида дефекта и NK нагнетателей.

В своей совокупности параметры $\varepsilon_{\text{пр}}(Y_{k,i}, S_{k,j,i})$, $\eta_{\text{пол}k,i}(Y_{k,i}, S_{k,j,i})$, $Q_{\text{пр}k,j,i}(Y_{k,i})$ и $D_{k,j,i}(Y_{k,i})$ позволяют:

- определить все режимные параметры нагнетателя (мощность, коммерческую производительность, полнотропный напор и т. д.);
- оценить выполнение требований технической документации на нагнетатель.

В простейшем случае решение системы (1) удовлетворяет требованиям технической документации на нагнетатель, если выполняется следующая система ограничений:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{пр} \min} \leq \varepsilon_{\text{пр}k,i}(Y_{k,i}) \leq \varepsilon_{\text{пр} \max} \\ \eta_{\text{пол} \min} \leq \eta_{\text{пол}k,i}(Y_{k,i}) \leq \eta_{\text{пол} \max} \\ Q_{\text{пр} \min} \leq Q_{\text{пр}k,j,i}(Y_{k,i}) \leq Q_{\text{пр} \max} \\ 0 \leq D_{k,j,i}(Y_{k,i}) \leq 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр} \min}$, $\varepsilon_{\text{пр} \max}$, $\eta_{\text{пол} \min}$, $\eta_{\text{пол} \max}$, $Q_{\text{пр} \min}$, $Q_{\text{пр} \max}$ – предельные значения параметров нагнетателя с учетом возможных максимальных дефектов их проточных частей.

Искомая вероятность определения режимных параметров NK нагнетателей $P(\{\bar{Y}_i\}, \{\bar{S}_{k,j,i}\})$ может быть представлена в следующем виде:

$$P(\{\bar{Y}_i\}, \{\bar{S}_{k,j,i}\}) = \frac{\sum_{i=1}^{NI} \sum_{k=1}^{NK} NF_{k,c,i}(Y_i, S_{k,j,i})}{\sum_{i=1}^{NI} \sum_{k=1}^{NK} NR_{k,i}},$$

где $NF_{k,c,i}$ – признак наличия решения: $NF_{k,c,i} = 1$, если найдено решение системы (1), которое удовлетворяет системе ограничений (2) для k -го ЦБН с j -м видом обобщенного дефекта при i -м измерении, в противном случае $NF_{k,c,i} = 0$; $NR_{k,i}$ – признак работы нагнетателя: $NR_{k,i} = 1$,

если k -й нагнетатель при i -ом измерении работал на «магистраль», в противном случае $NR_{k,i} = 0$.

В математической форме второй критерий может быть представлен в виде условия

$$P(\{\bar{Y}_i\}, \{S_c\}) > \max \text{ по } \{\bar{S}_c\}.$$

Второй критерий. Оценки погрешностей каналов измерения должны удовлетворять требованиям технической документации на эти каналы.

Требования технической документации в части погрешностей каналов измерения могут быть преобразованы в следующую систему требований к оценкам их случайной и систематической погрешности:

- математическое ожидание оценки случайной составляющей погрешности должно равняться нулю;
- математическое ожидание оценки систематической составляющей не должно превышать предельной величины соответствующей погрешности, оговоренной в технической документации;
- величина среднеквадратичного отклонения оценки случайной составляющей погрешности не должна превышать величину среднеквадратичного отклонения соответствующей случайной составляющей погрешности измерения;
- величина среднеквадратичного отклонения текущих оценок систематических погрешностей, вычисляемых по каждому вектору измерения Y_i , должна быть минимальной.

Первые два требования носят характер ограничений и учитываются непосредственно в ходе решения задачи. Два последних требования формулируются в виде одного из оптимизационных критериев достоверности.

Так, оценка систематической составляющей погрешности определяется как математическое ожидание выбранного вектора смещения при условии равенства нулю математического ожидания случайной составляющей.

Ограничения на величину систематической составляющей учитываются непосредственно при определении границ области возможных значений векторов смещения и при последующем выборе оптимальных значений этих векторов из множества возможных, для которых выполняется данное требование.

Области возможных значений векторов смещения $\{OK_{k,i}\}$, $k = 1, 2, \dots, NK$ определяются, с одной стороны, допустимыми по технической документации значениями систематической и случайной составляющих погрешностей, а с другой – взаимосвязью фактических значений измеряемых параметров.

Например, для параллельной схемы включения нагнетателей в КЦ эти соотношения имеют вид

$$\begin{cases} P_{\text{ВХ } i}^f = P_{\text{ВХ } 1,i}^f + dP_{\text{ВХ } 1} = \dots = P_{\text{ВХ } NK,i}^f + dP_{\text{ВХ } NK} \\ P_{\text{ВЫХ } i}^f = P_{\text{ВЫХ } 1,i}^f - dP_{\text{ВЫХ } 1} = \dots = P_{\text{ВЫХ } NK,i}^f - dP_{\text{ВЫХ } NK} \\ T_{\text{ВХ } i}^f = T_{\text{ВХ } 1,i}^f = \dots = T_{\text{ВХ } NK,i}^f \\ T_{\text{ВЫХ } i}^f = T_{\text{ВЫХ } 1,i}^f + dT_{\text{ВЫХ } 1} = \dots = T_{\text{ВЫХ } NK,i}^f - dT_{\text{ВЫХ } NK} \end{cases}, \quad (3)$$

где $dP_{\text{ВХ } k}$, $dP_{\text{ВЫХ } k}$ – потери давления газа на входном и выходном коллекторах k -го нагнетателя соответственно; $dT_{\text{ВЫХ } k}$ – возможный разброс значения температуры газа на выходе k -го нагнетателя из-за отклонения его КПД относительно среднего значения КПД нагнетателей по КЦ.

В соответствии с принятой моделью каналов измерения фактические значения параметров нагнетателя $X_{k,i}^f$ и параметров КЦ X_{cehi}^f принадлежат соответственно областям $OBX_{k,i}$ и OCH_i

$$X_{k,i}^f \in OBX_{k,i}, \quad X_{cehi}^f \in OCH_i$$

$$OBX_{k,i} = ((Y_{k,i} - \delta Y), (Y_{k,i} + \delta Y))$$

$$OCH_i = ((Y_{cehi} - \delta Y_{ceh}), (Y_{cehi} + \delta Y_{ceh}))$$

где $\delta Y_i, \delta Y_{ceh,i}$ – векторы предельно возможных отклонений фактических значений параметров от соответствующих измеренных.

Значения параметров $\delta Y_i, \delta Y_{ceh,i}$ определяются по технической документации на каналы измерения как сумма максимально возможной систематической составляющей погрешности и удвоенного значения среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности.

Исходя из условий совместной работы нагнетателей в КЦ (3) и связи фактических значений параметров с измеренными (3), представляется возможным определить некие интегральные области $\{EX_i\}$, в которых будут находиться значения параметров всех нагнетателей КЦ

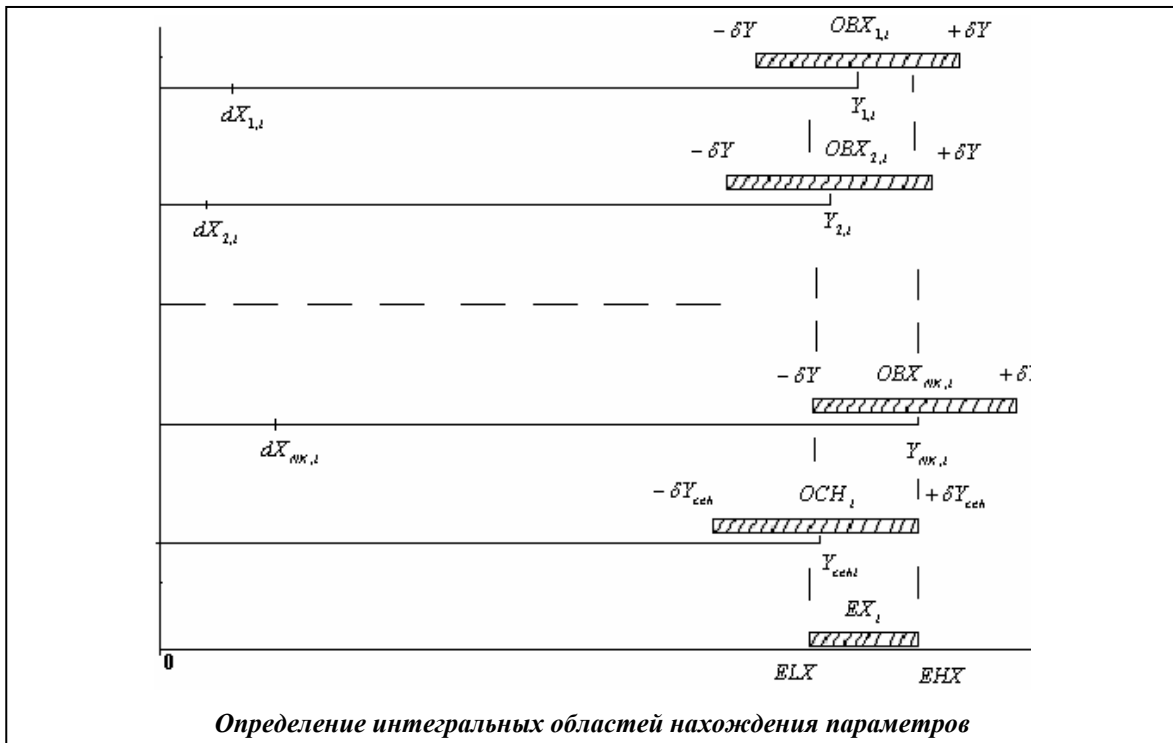
$$EX_i = \bigcup_{k=1}^{Nk} OAX_{k,i} \bigcup OCH_i = (ELX_i, EHX_i).$$

Здесь символы $ELXi, EHXi$ и H означают верхнюю и нижнюю границы соответствующих интегральных областей.

Графическое представление определения границ интегральной области EX_i для параллельной схемы подключения нагнетателей в КЦ отражено на рисунке.

Условия определения интегральных областей EX_i для других схем подключения нагнетателей в КЦ могут быть получены аналогичным образом на основе соответствующих условий совместной работы нагнетателей.

Нижние и верхние границы области возможных значений векторов смещения каналов измерения $OLX_{k,i}, OHX_{k,i}$ по каждому k -му нагнетателю определяются как разность между соответственно нижней и верхней границами интегральных областей параметра и вектором измерения



$$\begin{cases} OLX_{k,i} = ELX_{k,i} - Y_{k,i}; \\ OHX_{k,i} = EHX_{k,i} - Y_{k,i}; \\ OX_{k,i} = (OLX_{k,i}, OHX_{k,i}). \end{cases}$$

Ограниченное множество возможных значений вектора смещения $\{S_{k,j,i,t}\}$ $t=1, 2, \dots, NT$ формируется внутри этих областей.

Полученные результаты

При эксплуатации ГТС для определения (расчета) потерь давлений и температуры газа на входе и выходе КС используются данные диспетчерских журналов и САУ ГПА, КЦ; информация за различные периоды времени и для разных подключенных ГПА. Для повышения достоверности проводится статистическая обработка полученных данных [3, 4]. Полученные результаты обрабатываются в программе, написанной в среде .Net, в соответствии с двумя критериями, описанными выше. В табл. 5 приведены результаты расчета потерь давления и температур на входе и выходе для ряда КЦ ГТС Украины после обработки данных.

Таблица 5. Потери давлений и температур газа на входе и выходе КС

Наименование КЦ ГРС	Потери давления газа, кгс/см ²		Потери температуры газа на входе КЦ, °С
	на входе в КЦ	на выходе из КЦ	
Машевка	0,3	0,8	0,6
Боровая	0,4	0,8	0,0
Первомайск	0,7	0,4	0,1
Кременчуг	0,3	0,6	0,8
Тальное	0,1	0,5	0,0
Бар-1	0,2	0,4	0,0
Гусятин	0,4	0,1	0,0
Ставище	0,3	0,7	0,0
Ильинцы	0,25	1,05	0,0
Софиевка	0,4	0,7	0,2
Гайсин	0,6	0,64	0,02

Выводы

В работе проведен анализ влияния потерь давлений и температур газа на показатели эффективности работы ГПА. Произведена оценка этих потерь для ряда КС ДК «Укртрансгаз» в соответствии с разработанными критериями.

Литература

1. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – 51 с.
2. Ильченко Б. С. Определение индивидуальных характеристик ЦБН на основе цеховых режимных параметров / Б. С. Ильченко, В. Л. Лившиц, Б. И. Измалков и др. // Нефть и газ Украины : Междунар. науч.-практ. конф. – 2002: Сб. науч. тр. – Киев. – 2002. – Т. 2. – С. 187–188.
3. Ильченко Б. С. Розроблення методу визначення показників технічного стану ВЦН і ГТУ в умовах невизначеності вхідної оперативної інформації / Б. С. Ильченко, Б. І. Измалков, В. Л. Лівшиць та ін. // Звіт про НДР. № держреєстрації 0101U002503. – 2001. – 78 с.
4. Михалевич В. С. Методы последовательной оптимизации / В. С. Михалевич, А. И. Кукса. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

Поступила в редакцию
25.09.09

К 75-ЛЕТИЮ А. Е. БОЖКО

12 июля 2010 года исполняется 75 лет со дня рождения, 57 трудовой, 48 научной и 40 лет педагогической деятельности заведующего отделом надежности и динамической прочности Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Национальной академии наук Украины, заслуженного изобретателя Украины Божко Александра Евгеньевича.

Александр Евгеньевич Божко – известный украинский ученый в области надежности, динамики и прочности машин и оптимального управления динамическими объектами, в том числе системами воспроизведения вибраций. Он внес значительный вклад в развитие отечественной науки, выполнив оригинальные фундаментальные и прикладные научные исследования по актуальным проблемам воспроизведения одно- и многокоординатных вибраций при динамических испытаниях, вибродиагностики и виброзащиты различных объектов, прочности материалов и элементов конструкций в условиях динамического нагружения.

А.Е. Божко является автором 858 научных публикаций, 24 монографий, 290 патентов и а. с. на изобретения. Он лауреат премий АН Украины им. Г. Ф. Проскуры, им. В. М. Хрущева республиканской им. В. К. Семинского, член национальных комитетов Украины по теоретической и прикладной механике и по теории машин и механизмов.

Редакция журнала сердечно поздравляет юбиляра и желает ему здоровья и дальнейших успехов в его многогранной творческой деятельности!