

А. С. Гишваров, Е. А. Могильницкий, И. И. Гиззатуллин

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Решается задача оценки состояния наземного газотурбинного привода (ГТП) АЛ-31СТ компрессора газоперекачивающей станции с использованием в качестве источника информации энтропии К. Шеннона, определяемой по априорным статистическим данным отказов ГТП в эксплуатации. *Газотурбинный привод (ГТП); компрессор; диагностика состояния; энтропия; интенсивность и вероятность отказов; количество информации; разработка*

Перевод газотурбинных приводов (ГТП) компрессоров газоперекачивающих станций на эксплуатацию по техническому состоянию предполагает наличие эффективной системы обслуживания, включающей диагностику и прогнозирование состояния, позволяющие обнаруживать неисправности ГТП до наступления катастрофического состояния. Опыт эксплуатации ГТП показывает, что информационный потенциал контролируемых параметров, являющихся носителями информации об объекте диагностирования, используется не в полной мере. Очевидно, что это ведет к снижению эффективности системы оценки и прогнозирования состояния ГТП. В данном случае повысить эффективность представляется возможным за счет: использования априорных статистических данных состояния ГТП, включая вероятностную оценку проявления состояний, диагностические признаки этих состояний; оптимального выбора метода диагностики; более полного учета информационной ценности контролируемых в эксплуатации параметров, при этом отдавая предпочтение параметрам, обладающим максимальной информативностью. В работах [4–6] было предложено использовать информационную энтропию К. Шеннона для решения задач по оценке состояния изделий типа авиационных ГТД. Понятие «информация» в теории связи трактуется по-разному:

- одно из них совпадает с энтропией Больцмана и является фактически мерой неопределенности системы при ее статистическом описании;

- второе выражается через разность значений безусловной и условной энтропий.

Конкретизация второго определения позволяет ввести меру информации о состоянии технической системы в зависимости от значений управляющих параметров.

Предложенная К. Шенноном мера предназначалась для анализа сообщений, передаваемых по каналам связи, и является чрезвычайно удобной по причине простоты ее вычисления; аддитивности по отношению к последовательно поступающим сообщениям; сродства с важной физической величиной – термодинамической энтропией. Применительно к техническим изделиям типа газотурбинных двигателей (приводов) и энергетических установок (ЭУ) она становится единственной и универсальной мерой количества информации, т. е. в информационных процессах ГТП и ЭУ этот параметр может быть использован в качестве оценочного параметра.

В настоящее время широкое распространение получила параметрическая диагностика состояния ГТП [1–3, 7], что объясняется ростом количества диагностируемых элементов на современных ГТП и ЭУ. Однако по причине наличия неопределенности в трактовке получаемой информации, эффективность диагностирования ГТП остается невысокой, являясь источником возникновения ошибок 1 и 2 рода.

Одним из направлений повышения эффективности диагностики состояния является применение статистических моделей, отражающих поведение ГТП и ЭУ в различных состояниях, включая отказные. В данном случае оценка состояния сводится к отнесению фактического состояния объекта к одному из нескольких классов, перечень которых известен заранее:

Контактная информация: ad@mail.rb.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки Российской Федерации.

при этом каждый класс характеризуется собственным эталоном, со своими усредненными по параметрам признаками [6]. Поскольку информационная ценность контролируемых параметров ГТП и ЭУ неодинакова, то важно выявить из них наиболее ценные для диагностики состояния.

Формирование номенклатуры диагностических признаков может проводиться несколькими методами [3, 8, 9]:

- методом малых отклонений, где имеющие наибольшие значения коэффициенты влияния, признаются наиболее информативными;
- методом факторного анализа, где по результатам многофакторного эксперимента определяется связь обобщенного показателя качества объекта с контролируемыми параметрами и проводят оценку значимости коэффициентов полученной функциональной зависимости;
- математическим моделированием или полунатурными испытаниями объекта, где после проведения серии экспериментов, связанной с имитацией характерных отказов, определяются признаки, наиболее чувствительные к изменению состояния объекта;
- методом экспертных оценок, где перечень контролируемых параметров объекта устанавливается с учетом мнений экспертов, являющихся специалистами в данной области;
- оптимизацией перечня контролируемых параметров, позволяющего оценить экстремум выбранного критерия оптимальности.

При наличии определенной совокупности диагностических признаков K_1, K_2, \dots, K_N , характеризующих возможные состояния объекта, он в произвольный момент может находиться либо в исправном состоянии D_0 с вероятностью P_0 , либо в любом из отказных состояний D_1, D_2, \dots, D_r с соответствующими вероятностями $P(D_1), P(D_2), \dots, P(D_r)$. Влияние отказов различных элементов объекта определяется с помощью матрицы состояний $M = \|M_{ij}\|_{N(r+i)}$, число строк которой равно общему количеству признаков, а число столбцов – количеству возможных состояний объекта. При этом $M_{ij} = 1$, если параметр d_k принимает допустимые значения состояния D_j , и $M_{ij} = 0$ – в противном случае.

Полная информационная энтропия К. Шеннона определяется по формуле [8]:

$$H_0 = -\sum_{j=0}^r P(D_j) \cdot \ln P(D_j). \quad (1)$$

Очередной контроль признака состояния объекта в эксплуатации ведет к снижению энтропии, поскольку несет информацию о его состоянии. При этом средняя условная энтропия объекта после регистрации признаков состояния становится равной сумме:

$$H_i = P(d_{Ki}) \cdot H(d_{Ki}) + P(\bar{d}_{Ki}) \cdot H(\bar{d}_{Ki}), \quad (2)$$

где $P(d_{Ki})$ и $P(\bar{d}_{Ki})$ – соответственно вероятности получения результатов о состоянии объекта «в норме» и «не в норме»; $H(d_{Ki})$ и $H(\bar{d}_{Ki})$ – соответствующие данным результатам условные энтропии.

Значения $P(d_{Ki})$ и $P(\bar{d}_{Ki})$ определяются, используя матрицу состояний, по формулам:

$$P(d_{Ki}) = \sum_{j \in \Omega_i} P(D_j); \quad P(\bar{d}_{Ki}) = \sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j), \quad (3)$$

где $\Omega_i = [j: M_{ij} = 0]$ – множество индексов, составленное из номеров столбцов j , имеющих символы 0 на пересечении с i -й строкой матрицы M .

Энтропия состояния объекта после проведения оценки состояния по признаку K_i определяется по формулам:

$$H(K_i) = -\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j/K_i) \ln P(D_j/K_i); \quad (4)$$

$$H(\bar{K}_i) = -\sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j/\bar{K}_i) \ln P(D_j/\bar{K}_i), \quad (5)$$

где $\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j/K_i)$, $\sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j/\bar{K}_i)$ – условные вероятности, соответствующие различным результатам оценки объекта по признаку K_i , определяемые по формуле Байеса [8]:

$$P(D_j/K_i) = \frac{P(D_j)}{\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j)}; \quad P(D_j/\bar{K}_i) = \frac{P(D_j)}{\sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j)}. \quad (6)$$

Подставляя (4), (5), (6) в (2), определим количество информации, полученное в результате диагностирования объекта по признаку K_i :

$$I(K_i) = H_0 - H_i(K_i). \quad (7)$$

Аналогичные расчеты проводятся для всех признаков K_i ($i = 1, 2, \dots, N$), из которых выбирается признак с максимально полезной информацией и который должен контролироваться в первую очередь.

Далее по порядку проверяется признак K_m , обеспечивающий максимум условной информации относительно нового состояния объекта с энтропией H_{ii} и т. д. Таким образом, условная энтропия $H_{ii}(K_i/K_i)$, определяется по формуле:

$$H_{il}(K_i/K_l) = P(K_i/K_l) \cdot H(K_i/K_l) + P(\bar{K}_i/K_l) \cdot H(\bar{K}_i/K_l) + P(K_i/\bar{K}_l) \cdot H(K_i/\bar{K}_l) + P(\bar{K}_i/\bar{K}_l) \cdot H(\bar{K}_i/\bar{K}_l), \quad (8)$$

где $P(K_i/K_l)$ и $P(\bar{K}_i/K_l)$ – соответственно условные вероятности того, что признак K_i находится в пределах своего поля допуска или вне его пределов, если ранее зарегистрированный признак K_i «в норме»; $P(K_i/\bar{K}_l)$ и $P(\bar{K}_i/\bar{K}_l)$ – условные вероятности нахождения признака K_i в заданных пределах.

Для всех $i \neq l$:

$$P(K_i/K_l) = \sum_{j \in (\Omega_i \cap \Omega_l)} P(D_j/K_i); \quad P(\bar{K}_i/K_l) = \sum_{j \in (\Omega_i \cap \Omega_l)} P(D_j/K_i);$$

$$H(K_i/K_l) = - \sum_{j \in (\Omega_i \cap \Omega_l)} P(D_j/K_i, K_l) \ln P(D_j/K_i, K_l); \quad (9)$$

Количество информации, полученное в результате контроля признака K_i ($i \neq l$) относительно состояния, возникшего после диагностирования по признаку K_l , определяется по формуле:

$$I(K_i/K_l) = H_l(K_l) - H_{il}(K_i/K_l). \quad (10)$$

Очевидно, что можно найти такой признак K_m , для которого:

$$I(K_m/K_l) = \max I(K_i/K_l). \quad (11)$$

Рассмотрим процедуру оценки информативности диагностических признаков объекта на примере наземной энергетической установки ГТП АЛ-31СТ.

Было исследовано 47 приводов, эксплуатирующихся на различных объектах «Газпром».

Обработкой статистических данных были определены системы ГТП, наиболее подверженные неисправностям: масляная (МС) и топливная (ТС) системы, турбина высокого давления (ТВД) и система механизации компрессора (МК). Поскольку исходные вероятности состояний ГТП являются функциями времени, то определение совокупности наиболее информативных признаков проводилось для нескольких значений t в интервале $(0 \dots T_c)$, где T_c – время работы системы ГТП. Вероятность отказа в каждой из подсистем подчиняется экспоненциальному закону:

$$P_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i \cdot t}, \quad (i = 1, 2, \dots, 4), \quad (12)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивности отказов, значения которых приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Интенсивность отказов МС			
Δt_i , час	Δn_i	$n_i(t)$	$\lambda_i(t)$, час ⁻¹
0-1000	11	0	0,000234
1000-2000	4	11	0,000111
2000-3000	5	15	0,000156
3000-4000	3	20	0,000111
4000-5000	1	23	0,000042
5000-6000	0	24	0
6000-7000	2	24	0,000087
7000-8000	2	26	0,000095
		Σ	0,000836
		λ_{cp}	0,000105

Таблица 2

Интенсивность отказов ТС			
Δt_i , час	Δn_i	$n_i(t)$	$\lambda_i(t)$, час ⁻¹
0-1000	7	0	0,000149
1000-2000	9	7	0,000225
2000-3000	4	16	0,000129
3000-4000	6	20	0,000222
4000-5000	0	26	0
5000-6000	0	26	0
6000-7000	0	26	0
7000-8000	2	26	0,000095
		Σ	0,00082
		λ_{cp}	0,000103

Таблица 3

Интенсивность отказов ТВД			
Δt_i , час	Δn_i	$n_i(t)$	$\lambda_i(t)$, час ⁻¹
0-1000	4	0	0,000085
1000-2000	0	4	0
2000-3000	1	8	0,000026
3000-4000	3	9	0,000079
4000-5000	5	12	0,000143
5000-6000	3	17	0,0001
6000-7000	2	20	0,000074
7000-8000	2	22	0,00008
		Σ	0,000587
		λ_{cp}	0,000073

Таблица 4

Интенсивность отказов МК			
Δt_i	Δn_i	$n_i(t)$	$\lambda_i(t)$
0-1000	3	0	0,000064
1000-2000	0	3	0
2000-3000	3	3	0,000068
3000-4000	0	6	0
4000-5000	1	6	0,000024
5000-6000	0	7	0
6000-7000	0	7	0
7000-8000	0	7	0
		Σ	0,000156
		λ_{cp}	0,00002

Видно, что при эксплуатации ГТП, наиболее часто встречающиеся отказы вышперечисленных узлов и систем распределены неравномерно. Для дальнейшего анализа интервал наработки был разделен на три:

- в интервале от 0 до 3000 часов наиболее часто встречаются отказы МС и ТС;
- в интервале от 3000 до 6000 часов преобладают отказы ТВД;
- в интервале от 6000 до 8000 часов преобладают отказы МС и ТВД.

В интервале наработки от 0 до 3000 часов ГТП может находиться в одном из трех состояний (D_0, D_1, D_2) (табл. 5):

- D_0 – все системы исправны;
- D_1 – неисправность МС ($\lambda_1 = \lambda_{МС} = 0,000167$);
- D_2 – неисправность топливной системы ($\lambda_2 = \lambda_{ТС} = 0,000168$).

Таблица 5

Матрица состояний ГТП

Признак состояния двигателя	Состояние двигателя		
	D_0	D_1	D_2
1. K_1 (повышение температуры масла в линии откачки из опоры турбины более чем на 10°C при неизменном режиме ($N_{ст} = \text{const}$))	0	1	0
2. K_2 (повышение температуры газов перед СТ (T_4) более чем на 20°C при неизменном режиме ($N_{ст} = \text{const}$) и постоянной температуре на входе в двигатель ($T_1 = \text{const}$))	0	0	0
3. K_3 (повышенный расход масла (более $0,5$ кг/час))	0	1	0
4. K_4 (высокий разброс показаний температуры газов перед СТ ($\Delta T_4 > 110^\circ\text{C}$))	0	0	1
5. K_5 (увеличение перепада давления на фильтрах в линии нагнетания и откачки на величину $0,2 \dots 0,3$ кг/см ² за время $0 \dots 24$ часа)	0	1	0
6. K_6 (выбег роторов, сек)	0	1	0
7. K_7 (рассогласование задания и положения клапана перепуска воздуха (КПВ), α_3)	0	0	0
8. K_8 (рассогласование задания и положения направляющих аппаратов (НА) КВД, α_2)	0	0	0
9. K_9 (негерметичность)	0	1	1
10. K_{10} (неисправность датчиков (отказ каналов измерения))	0	1	1

Средние значения вероятностей реализации каждого из состояний в интервале наработки $0 \dots 3000$ часов следующие:

$$P_0 = \frac{1}{t(\lambda_1 + \lambda_2)} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = 0,634;$$

$$P_1 = \frac{1 - e^{-(\lambda_2)t}}{\lambda_2} \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{\lambda_1 + \lambda_2} = 0,155;$$

$$P_2 = \frac{1 - e^{-(\lambda_1)t}}{\lambda_1} \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{\lambda_1 + \lambda_2} = 0,156.$$

По формуле (1) энтропия исходного состояния ГТП равна:

$$H_0 = -(P_0 \ln(P_0) + P_1 \ln(P_1) + P_2 \ln(P_2)) = 0,867.$$

В процессе исследования принималось, что состояние ГТП характеризуется десятью признаками K_1, \dots, K_{10} .

Тогда средняя условная энтропия состояния ГТП при условии изменения признака K_1 будет равна:

$$H_{K_1} = (P_0 + P_2) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_2} \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_2}\right) \right) + \left(-\frac{P_2}{P_0 + P_2} \ln\left(\frac{P_2}{P_0 + P_2}\right) \right) = 0,392.$$

Аналогично находим среднюю условную энтропию состояния ГТП при условии изменения признаков K_2, K_4 и K_9 :

$$H_{K_2} = 0,813; H_{K_4} = 0,390; H_{K_9} = 0,215;$$

$$H_{K_1} = H_{K_3} = H_{K_5} = H_{K_6} = 0,392;$$

$$H_{K_2} = H_{K_7} = H_{K_8} = 0,813;$$

$$H_{K_9} = H_{K_{10}} = 0,215.$$

В интервале наработки от 0 до 6000 часов ГТП может находиться в одном из четырех состояний (D_0, D_1, D_2, D_3):

- D_0 – все системы исправны;
- D_1 – неисправность МС ($\lambda_1 = \lambda_{МС} = 0,0001$);
- D_2 – неисправность ТС ($\lambda_2 = \lambda_{ТС} = 0,00012$);
- D_3 – неисправность ТВД ($\lambda_3 = \lambda_{ТВД} = 0,00007$).

Средние значения вероятностей реализации каждого из состояний в данном интервале наработки составляют:

$$P_0 = 0,837; P_1 = 0,131; P_2 = 0,148; P_3 = 0,081.$$

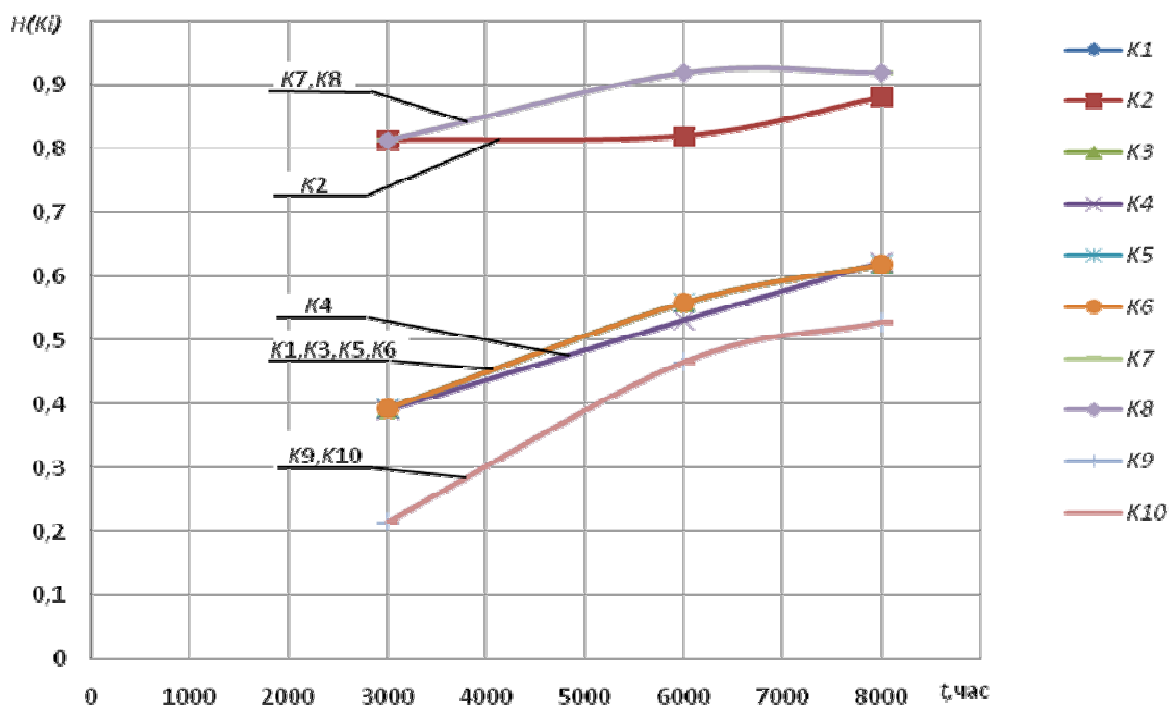


Рис. 1. Изменение информационной энтропии ГТП АЛ-31СТ по наработке

При этом энтропия исходного состояния ГТП равна:

$$H_0 = -\left(\sum_{j=0}^4 P_j \ln(P_j)\right) = 0,901.$$

Матрица состояний ГТП для рассматриваемого случая по структуре аналогична табл. 5.

Средняя условная энтропия состояния ГТП при условии изменения признака K_1 равна:

$$H_{K_1} = 0,558.$$

Аналогично находим среднюю условную энтропию состояния ГТП при условии изменения признаков K_2, K_4, K_7 и K_9 :

$$H_{K_2} = 0,820; H_{K_4} = 0,531; H_{K_7} = 0,919;$$

$$H_{K_9} = 0,466;$$

$$H_{K_1} = H_{K_3} = H_{K_5} = H_{K_6} = 0,558;$$

$$H_{K_7} = H_{K_8} = 0,919; H_{K_9} = H_{K_{10}} = 0,466.$$

В интервале наработки от 0 до 8000 часов ГТП может находиться в одном из 5 состояний (D_0, D_1, D_2, D_3, D_4):

- D_0 – все системы исправны;

- D_1 – неисправность МС

($\lambda_1 = \lambda_{МС} = 0,0001$);

- D_2 – неисправность ТС

($\lambda_2 = \lambda_{ТС} = 0,0001$);

- D_3 – неисправность ТВД

($\lambda_3 = \lambda_{ТВД} = 0,00007$);

- D_4 – неисправность системы механизации компрессора ($\lambda_4 = \lambda_{СМК} = 0,00002$).

Средние значения вероятностей реализации каждого из состояний в данном интервале наработки составляют:

$$P_0 = 0,910; P_1 = 0,127;$$

$$P_2 = 0,129; P_3 = 0,082; P_4 = 0,020.$$

При этом энтропия исходного состояния ГТП: $H_0 = 0,89$.

Средняя условная энтропия состояния ГТП при условии изменения признака K_1 :

$$H_{K_1} = 0,618.$$

Аналогично находим среднюю условную энтропию состояния ГТП при условии изменения признаков K_2, K_4, K_7 и K_9 : $H_{K_9} = 0,528$;

$$H_{K_2} = 0,881; H_{K_4} = 0,623; H_{K_7} = 0,919;$$

$$H_{K_1} = H_{K_3} = H_{K_5} = H_{K_6} = 0,617716;$$

$$H_{K_9} = H_{K_{10}} = 0,528.$$

Результаты расчета количества информации в интервалах приведены в табл. 6.

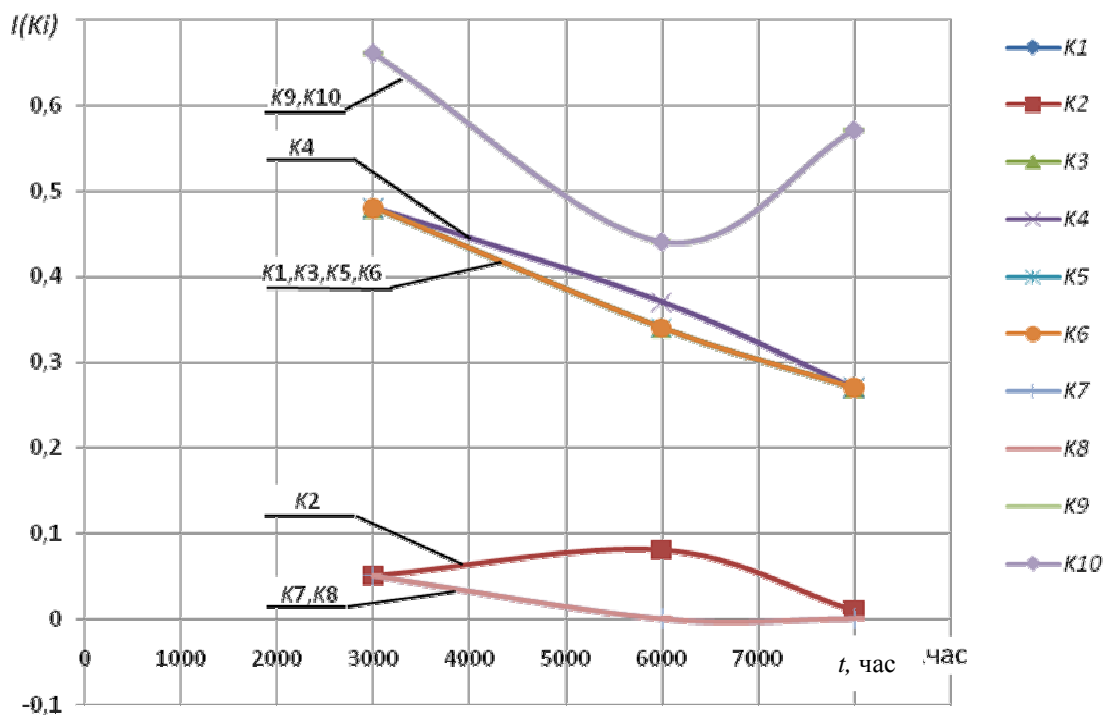


Рис. 2. Изменение информативности признаков состояния ГТП АЛ-31СТ по наработке

Таблица 6

$I(K_i)$	$t = 3000\text{ч}$	$t = 6000\text{ч}$	$t = 8000\text{ч}$
$I(K_1)$	0,48	0,34	0,27
$I(K_2)$	0,05	0,08	0,01
$I(K_3)$	0,48	0,34	0,27
$I(K_4)$	0,48	0,37	0,27
$I(K_5)$	0,48	0,34	0,27
$I(K_6)$	0,48	0,34	0,27
$I(K_7)$	0,05	0	0
$I(K_8)$	0,05	0	0
$I(K_9)$	0,66	0,44	0,57
$I(K_{10})$	0,66	0,44	0,57

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- на всем интервале наработки 0...8000 ч наиболее информативными признаками являются K_9 (негерметичность) и K_{10} (неисправность датчиков (отказ каналов измерения));

- по мере наработки информативность всех признаков падает, за исключением признаков K_9 (негерметичность) и K_{10} (неисправность датчиков (отказ каналов измерения)), информативность которых до наработки 6000 ч падает на 34 %, а далее возрастает на 33 % относительно наработки $\tau = 6000$ часов. В данном случае снижение информативности признаков может быть связано с недостатком данных по отказам ГТП АЛ-31СТ;

- крайне низкую информативность имеют признаки K_7 (рассогласование задания и положения клапана перепуска воздуха (КПВ), α_3) и K_8 (рассогласование задания и положения направляющих аппаратов (НА) КВД, α_2). Также низкой является информативность признака K_2 (повышение температуры газов перед СТ (T_4) более чем на 20 °С при неизменном режиме ($N_{ст} = \text{const}$) и постоянной температуре на входе в двигатель ($T_1 = \text{const}$)).

С целью повышения достоверности оценки и прогнозирования состояния ГТП, в дальнейшем рекомендовано провести исследование эффективности методов факторного анализа, искусственных нейронных сетей и комбинированного применения методов параметрической диагностики состояния, включающей методы [2, 3]:

- диагностических матриц;
- наименьших квадратов, основанный на решении системы нормальных уравнений;
- наименьших квадратов, основанный на нелинейной оптимизации критерия состояния ГТП;
- идентификации, основанный на уравнении методом наименьших квадратов;
- идентификации, основанный на уравнении методом наименьших модулей.

Таблица 7

Метод	Вероятность распознавания состояния двигателя при n параметрах состояния										P_{Σ}^n	P_{Σ}^o	Θ
	$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		$n = 5$				
	P^n	P^o	P^n	P^o	P^n	P^o	P^n	P^o	P^n	P^o			
А	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	4
Б	1,0	0,0	0,8	0,2	0,13	0,87	0,0	1,0	0,0	1,0	0,39	0,61	2
В	1,0	0,0	0,9	0,1	0,53	0,47	0,0	1,0	0,0	1,0	0,51	0,49	1
Г	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	4
Д	0,6	0,4	0,23	0,77	0,13	0,87	0,0	1,0	0,0	1,0	0,19	0,81	3
Е	1,0	0,0	0,8	0,2	0,13	0,87	0,0	1,0	0,0	1,0	0,39	0,61	2

Примечание: P_i^n , P_i^o – вероятность правильной и ошибочной оценки состояния двигателя ($i = 1-3$); $P_{\Sigma}^n = \frac{1}{5} \cdot \sum_1^5 P_i^n$; $P_{\Sigma}^o = \frac{1}{5} \cdot \sum_1^5 P_i^o$; Θ – балльная оценка эффективности метода (при $\Theta = 1$ – эффективность наивысшая, при $\Theta = 4$ – эффективность наименьшая).

В табл. 7 приведен результат оценки эффективности перечисленных методов параметрической диагностики состояния, откуда видно, что, распознаемость методов различна и зависит от количества параметров состояния и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
2. Гишваров А. С., Габдуллин В. С., Нестеров А. В. Диагностика состояния авиационных ГТД с применением нейронных сетей // Вестник УГАТУ. 2009. № 2(31). С. 25–31.
3. Гишваров А. С., Приб И. В. Метод выбора оптимальных условий параметрического диагностирования состояния авиационных ГТД // Вестник УГАТУ. 2009. № 2(31). С. 3–10.
4. Машошин О. Ф. Оптимизация процессов диагностирования авиационной техники с использованием критериев информативности // Сб. науч. тр. конф. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2002.
5. Машошин О. Ф. Интерпретация теории К.Шеннона в классификационных задачах информационной диагностики авиадвигателей // Науч. вестник МГТУ ГА № 80. Серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонта АТ. Безопасность полетов», 2004.
6. Пивоваров В. А., Машошин О. Ф. Применение аппарата теории статистической классификации к задачам диагностирования авиационной тех-

ники // Науч. вестник МГТУ ГА № 20. Серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ. Безопасность полетов». 1999.

7. Пивоваров В. А. Прогрессивные методы технической диагностики. М.: РИО МГТУГА, 1999.

8. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / под ред. А.А.Свешникова. М.: Наука, 1970. 656 с.

9. Сиротин Н. Н., Коровкин Ю. М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979.

ОБ АВТОРАХ

Гишваров Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.

Могильницкий Евгений Анатольевич, асп. той же каф. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.

Гиззатуллин Ильшат Ильфирович, студент той же каф. Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.