

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Р. Р. Хотский<sup>1</sup>, А. В. Бураков<sup>2</sup>, Л. Г. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>808 военное представительство МО РФ, Россия, 192012, г. Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 123

<sup>2</sup>АО «Компрессор», Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой Сампсониевский, д. 64

В статье в качестве объекта диагностирования рассматривается поршневой компрессор, входящий в комплекс компрессорного оборудования для производства, хранения, распределения газов для космодромов, обеспечивающих запуск ракет-носителей. Выбрана модель диагностирования поршневого компрессора как основного устройства для производства сжатого воздуха, основанная на процессах изменения таких параметров воздуха, как давление, объем и температура за один полный цикл. Предложено использовать преобразование Гильберта—Хуанга для обработки диагностических параметров, полученных при анализе индикаторных диаграмм ступеней поршневого компрессора. Используя функцию корреляционного типа подобной метрике Хаусдорфа предлагается производить сравнение сигналов, полученных с технически неисправного поршневого компрессора и некоторого эталона (исправного поршневого компрессора) для идентификации характерных неисправностей.

**Ключевые слова:** поршневой компрессор, индикаторная диаграмма, преобразование Гильберта—Хуанга, модель диагностирования, диагностические параметры, техническая диагностика.

**Для цитирования:** Хотский Р. Р., Бураков А. В., Кузнецов Л. Г. Разработка математической модели технического диагностирования поршневых компрессоров ракетно-космического комплекса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 38—46. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-38-46. EDN: EVJMLE.



© Хотский Р. Р., Бураков А. В., Кузнецов Л. Г., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF RECIPROCATING COMPRESSORS FOR THE ROCKET AND SPACE COMPLEX

R. R. Khotsky<sup>1</sup>, A. V. Burakov<sup>2</sup>, L. G. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>808 Military Representative Office of the Russian Defense Ministry,  
Russia, Saint Petersburg, Babushkina St., 123, 192012

<sup>2</sup>JSC "Compressor", Russia, Saint Petersburg, Bolshoi Sampsonievsky Ave., 64, 194044

The article examines a piston compressor as the object of diagnostics, which is a part of the compressor equipment complex for the production, storage, and distribution of gases at launch sites providing launch vehicles. A diagnostic model for the piston compressor as for the primary device for producing compressed air has been selected, based on the processes of changes in air parameters such as pressure, volume, and temperature over one full cycle. The use of the Hilbert—Huang transforming is proposed for processing diagnostic parameters obtained from the analysis of indicator diagrams of the piston compressor stages. By applying a correlation-type function similar to the Hausdorff metric, the method compares signals from a technically faulty piston compressor with a reference (a properly functioning piston compressor) to identify characteristic malfunctions.

**Keywords:** reciprocating compressor, indicator diagram, Hilbert—Huang transforming, diagnostic model, diagnostic parameters, technical diagnostics.

**For citation:** Khotsky R. R., Burakov A. V., Kuznetsov L. G. Development of a mathematical model for technical diagnostics of reciprocating compressors for the rocket and space complex. *Omsk Scientific Bulletin*.



## Введение

Современные системы технического диагностирования, применяемые в ракетно-космической области, предусматривают использование широкого спектра физических явлений, реализацию сложных алгоритмов сбора, обработки, хранения и представления информации. Поэтому достоверная оценка технического состояния основного оборудования на стадии эксплуатации предполагает использование соответствующего диагностического инструментария, составными частями которого являются информационное, методическое, алгоритмическое, программное, аппаратное и организационное обеспечение [1].

Задачи, которые решает система технического диагностирования, определяется структурой объекта технического диагностирования (ОТД) и особенностями его технического обслуживания (ТО). В общем случае можно выделить две основные задачи [2, 3]:

1. Автоматизация процесса поиска причин нарушения работоспособности, правильности функционирования или исправности объекта.

2. Определение текущего технического состояния объекта и прогнозирование его изменения в процессе эксплуатации.

Решение первой задачи применимо к объектам, имеющим ярко выраженную блочную структуру. Особенность их эксплуатации состоит в том, что при потере ими работоспособности наибольшую трудность представляет определение вышедшего из строя элемента (блока). Восстановление работоспособности здесь осуществляется путем замены вышедшего из строя элемента на новый. К таким

объектам относятся различные радиотехнические средства, системы автоматического управления и т. д.

Для таких объектов, подобных компрессорам воздуха высокого давления (ВВД), наиболее важным является решение второй задачи. Знание текущего технического состояния таких объектов без их разборки дает возможность оптимально планировать ремонт и проводить своевременные профилактические работы; отказаться от регламентных мероприятий по дефектации и ревизии механизмов, нарушающих приработку их узлов и деталей; свести к минимуму возможные случайные отказы оборудования; значительно сократить время обнаружения причин нарушения работоспособности; более обоснованно решать вопросы использования технических средств и комплектование запасных частей, инструментов и принадлежностей [4].

## Основная часть

Объектом исследования является современная компрессорная станция транспортабельная (КСТ) на базе ЭКСА7,5-3М-1 НЯИД.064125.003ТУ вариант исполнения 53, созданная в рамках доработки компрессорной станции 8Г323М в части введения КСТ и обеспечения штатной эксплуатации ракетно-космического комплекса «Рокот». Параметры указаны в (табл. 1). Фотография КСТ на базе ЭКСА7,5-3М-1 приведена на рис. 1.

### Формирование математической модели многоступенчатого поршневого компрессора

Для формирования математической модели многоступенчатого поршневого компрессора (ПК)

Таблица 1. Технические параметры КСТ  
Table 1. Technical parameters of CST

| Наименование параметра                                                                                 | Значение                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Рабочая среда                                                                                          | Атмосферный воздух                      |
| Давление начальное (на входе в компрессор), МПа (мм рт. ст.)                                           | 0,1 (760)                               |
| Давление нагнетания ЭКСА7,5-3М-1, МПа:                                                                 |                                         |
| 1 ступень                                                                                              | 0,5                                     |
| 2 ступень                                                                                              | 3,3                                     |
| 3 ступень                                                                                              | 12                                      |
| 4 ступень                                                                                              | 40                                      |
| Производительность КСТ (приведенная к условиям 0,1 МПа (760 мм р. ст.) и 293 К (20°C), нм /ч, не менее | 140±5                                   |
| Влагосодержание воздуха соответствует точке росы, К (°C), не выше                                      | 218 (– 55)                              |
| Содержание масла в выдаваемом воздухе мг/м³, не более                                                  | 0,2                                     |
| Мощность потребляемая КСТ из сети 3–50 Гц 380 В, кВт, не более                                         | 130                                     |
| Температура всасываемого воздуха, °C                                                                   | от – 40 до + 40                         |
| Температура воздуха на выходе из КСТ, К (°C), не более                                                 | 323 (50)                                |
| Размер механических частиц в сжатом и осушенном воздухе, мкм, не более                                 | 5                                       |
| Система охлаждения                                                                                     | Автономная, замкнутая, жидкостного типа |
| Масса КСТ в «рабочем» состоянии (с охлаждающей жидкостью, хладагентом и маслом), кг, не более, ±3 %    | 11180                                   |
| Габаритные размеры КСТ в полностью смонтированном состоянии, Д×Ш×В, мм, не более                       | 7350×2535×3780                          |



Рис. 1. Компрессорная станция транспортабельная  
Fig. 1. Compressor station transportable

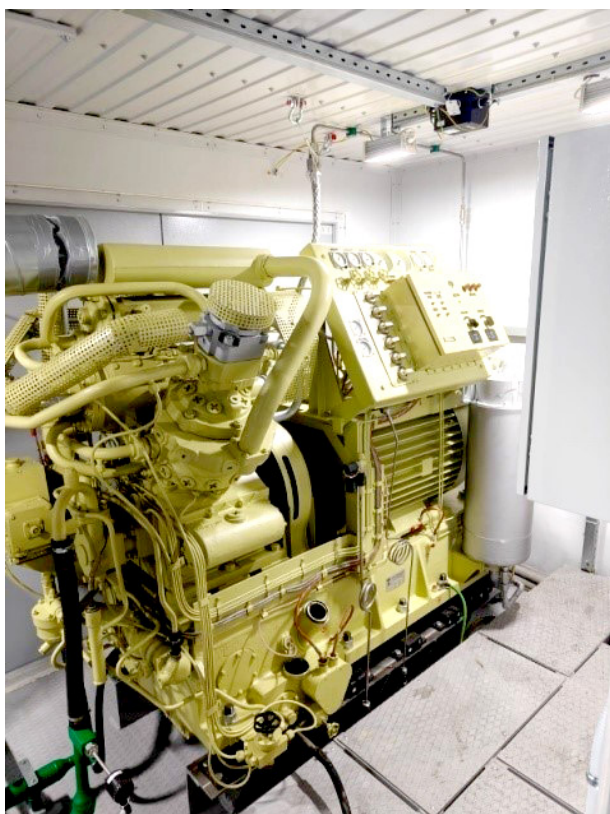


Рис. 2. Компрессорная станция ЭКСА7,5-3М-1  
Fig. 2. EKSA7.5-3M-1 compressor station

рассмотрим принципиальную схему четырехступенчатого компрессора ЭКСА7,5-3М-1 [5, 6]. Компрессорная станция ЭКСА7,5-3М-1 представлена на рис. 2.

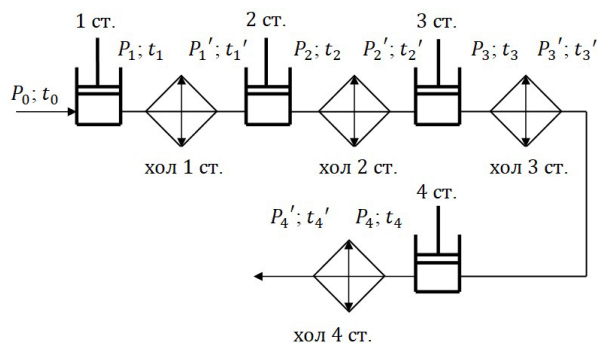


Рис. 3. Принципиальная схема поршневого компрессора типа ЭКСА7,5-3М-1:  $P_0$  — атмосферное давление;

$t_0$  — температура атмосферного воздуха;  
 $P_1$  — давление нагнетания 1-й ступени;  
 $t_1$  — температура воздуха после 1-й ступени;  
 $P_1'$  — давление после холодильника 1-й ступени;  
 $t_1'$  — температура воздуха после холодильника 1-й ступени;  $P_2$  — давление нагнетания 2-й ступени;  
 $t_2$  — температура воздуха после 2-й ступени;  
 $P_2'$  — давление после холодильника 2-й ступени;  
 $t_2'$  — температура воздуха после холодильника 2-й ступени;  $P_3$  — давление нагнетания 3-й ступени;  
 $t_3$  — температура воздуха после 3-й ступени;  
 $P_3'$  — давление после холодильника 3-й ступени;  
 $t_3'$  — температура после холодильника 3-й ступени;  
 $P_4$  — давление нагнетания 4-й ступени;  $t_4$  — температура воздуха после 4-й ступени;  $P_4'$  — давление воздуха за компрессором;  $t_4'$  — температура воздуха за компрессором

Fig. 3. Schematic diagram of the EKSA7.5-3M-1 piston compressor type:  $P_0$  — atmospheric pressure;  $t_0$  — atmospheric air temperature;  $P_1$  — discharge pressure of the 1st stage;  $t_1$  — air temperature after the 1st stage;  $P_1'$  — pressure after the refrigerator of the 1st stage;  $t_1'$  — air temperature after the refrigerator of the 1st stage;  $P_2$  — discharge pressure of the 2nd stage;  $t_2$  — air temperature after the 2nd stage;  $P_2'$  — pressure after the refrigerator of the 2nd stage;  $t_2'$  — air temperature after the refrigerator of the 2nd stage;  $P_3$  — discharge pressure of the 3rd stage;  $t_3$  — air temperature after the 3rd stage;  $P_3'$  — pressure after the refrigerator of the 3rd stage;  $t_3'$  — air temperature after the refrigerator of the 3rd stage;  $P_4$  — discharge pressure of the 4th stage;  $t_4$  — air temperature after the 4th stage;  $P_4'$  — air pressure behind the compressor;  $t_4'$  — air temperature behind the compressor

Принципиально такая схема может быть составлена для любого ПК. Также необходимо отметить, что одноименные процессы, образующие действительный цикл в каждой ступени, идентичны друг другу. Следовательно, построение математической модели для многоступенчатого компрессора выполнено на основе анализа индикаторной диаграммы одной ступени с последующим обобщением результатов на ПК.

Принципиальная схема ПК типа ЭКСА7,5-3М-1 представлена на рис. 3.

Потери давления воздуха в каждом холодильнике и воздушном тракте между ступенями определяем как перепад:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_1';$$

$$\Delta P_2 = P_2 - P_2';$$

$$\Delta P_3 = P_3 - P_3';$$

$$\Delta P_4 = P_4 - P_4'.$$

Опираясь на экспериментальные данные по эксплуатации ПК такого типа, приняли, что в каждом

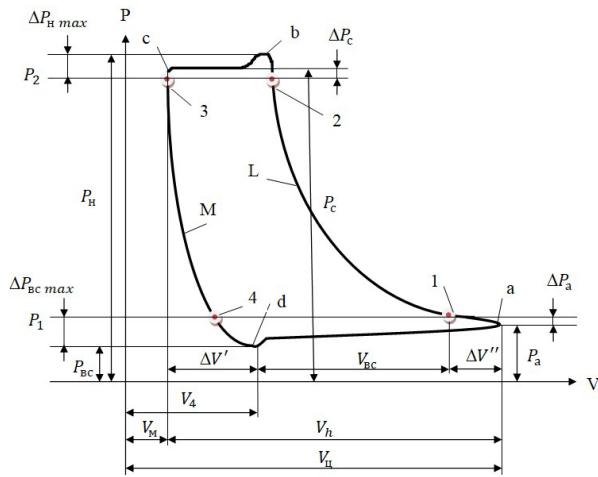


Рис. 4. Индикаторная диаграмма действительного цикла ступени компрессора: *d-a* — всасывание; *a-b* — сжатие; *b-c* — нагнетание; *c-d* — расширение;  $V_4$  — объем газа, расширившегося из мертвого пространства до момента открытия всасывающих клапанов;  $V_M$  — объем мертвого пространства;  $V_h$  — рабочий объем цилиндра ступени;  $V_{ц}$  — объем цилиндра;  $V_{вс}$  — объем всасываемого газа;  $P_h$  — давление нагнетания;  $P_c$  — давление в конце нагнетания;  $P_{вс}$  — давление всасывания;  $P_a$  — давление газа в конце всасывания

Fig. 4. Indicator diagram of the actual compressor stage cycle: *d-a* — suction; *a-b* — compression; *b-c* — injection; *c-d* — expansion;  $V_4$  — volume of gas expanded from the dead space until the suction valves are opened;  $V_M$  — volume of the dead space;  $V_h$  — working volume of the stage cylinder;  $V_{ц}$  — cylinder volume;  $V_{вс}$  — volume of the intake gas;  $P_h$  — discharge pressure;  $P_c$  — pressure at the end of discharge;  $P_{вс}$  — suction pressure;  $P_a$  — gas pressure at the end of the suction

промежуточном холодильнике охлаждение воздуха осуществляется до температуры, примерно на 5 °C превышающей начальную, т. е.:

$$T_1' = T_0 + 5;$$

$$T_2' = T_0 + 10;$$

$$T_3' = T_0 + 15;$$

$$T_4' = T_0 + 20.$$

Эти данные использованы при формировании математической модели в качестве граничных условий, связывающих между собой ступени компрессора.

В каждой из ступеней ПК действительный цикл (действительная индикаторная диаграмма) образуется четырьмя основными процессами [7], показанными на рис. 4.

Проанализируем приведенный цикл с точки зрения условий протекания процессов. Процесс сжатия является термодинамическим, так как во время его течения изменяются параметры воздуха. Он описывается на основе уравнения состояния газа [8].

$$P \cdot V^n = R \cdot T_1, \quad (1)$$

где  $n$  — переменная величина, зависящая от условий теплообмена между воздухом и стенками цилиндра. Процесс сжатия начинается с подводом тепла, так как вначале воздух холоднее стенок цилиндра, поэтому  $n > k$  ( $k = 1,4$ ) на кривой *a-L*.

В некоторой точке *L* наступает баланс температур, поэтому здесь  $n = k$ . Затем на промежутке *L-b* происходит отвод тепла от воздуха к стенкам цилиндра, поэтому  $n$  принимает значения  $-1 < n < k$ .

Повышение температуры при этом определяем по формуле

$$T = T_1 \cdot \pi_{kcm.i}^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2)$$

где  $\pi_{kcm.i}$  — степень повышения давления в  $i$ -й ступени. Кроме того, процесс сжатия имеет следующие особенности:

1) на интервале *a-1* происходит закрытие всасывающего клапана, т. е. за это время часть объема воздуха  $\Delta V''$  вытекает через открытый всасывающий клапан;

2) на интервале *2-b* происходит открытие нагнетательного клапана.

Процесс нагнетания *b-c* является механическим процессом, связанным с перемещением воздуха из цилиндра в нагнетательную полость. Давление в процессе нагнетания теоретически постоянно ( $P_h = \text{const}$ ). Однако необходимо учитывать сопротивление нагнетательных клапанов:

$$P_h = P + \Delta P, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  — гидродинамическое сопротивление на открытие нагнетательного клапана. Оно максимально в момент отрыва тарелки клапана от седла и несколько меньшее в процессе нагнетания. Можно считать, что в момент отрыва:  $\Delta P = \Delta P_{\text{max}}$ , а затем  $\Delta P = \text{const} < \Delta P_{\text{max}}$ .

Процесс расширения *c-d*, как и процесс сжатия, является политропным, с переменным показателем политропы  $n'$ . Он также может быть описан уравнением

$$P \cdot V^{n'} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $n'$  — переменная величина, зависящая от условий теплообмена между воздухом и стенками цилиндра. Процесс расширения начинается с отводом тепла, так как вначале воздух еще горячее стенок цилиндра, поэтому  $n' < k$  на кривой *c-M*. В некоторой точке *M* наступает баланс температур, поэтому здесь  $n' = k$ . Затем на промежутке *M-d* происходит подвод тепла к воздуху от стенок цилиндра, поэтому  $n'$  принимает значение  $-n' > k$ .

Уравнение объема газа  $V_4$ , расширившегося из мертвого пространства, будет иметь вид

$$V_4 = V_M \cdot \left( \frac{P_c}{P_{вс}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

где  $m$  — показатель политропы конечных параметров в процессе расширения.

Уравнение для температуры в процессе расширения примет вид

$$T = T_2 \cdot \left( \frac{1}{\pi_{kcm.i}} \right)^{\frac{n'-1}{n'}}, \quad (6)$$

Процесс всасывания *d-a*, как и процесс нагнетания, является механическим процессом, и он происходит практически при постоянном давлении  $P_{вс} = \text{const}$ , при этом его уравнение имеет вид

$$P_{bc} = P_{атм} - \Delta P_a, \quad (7)$$

где  $P_{атм}$  — давление атмосферного воздуха при нормальных условиях;  $\Delta P_a$  — давление затрачиваемое на преодоление гидродинамического сопротивления всасывающих клапанов. Оно максимально в момент отрыва тарелки клапана от седла и несколько меньшее в процессе всасывания. Можно считать, что в момент отрыва:  $\Delta P_a = \Delta P_{a \max}$ , а затем:  $\Delta P_a = \text{const} < \Delta P_{a \max}$ .

На основании выше приведенных зависимостей для ступени ПК можно записать математическую модель действительного цикла многоступенчатого компрессора типа ЭКСА7,5-3М-1.

Параметры воздуха на входе в компрессор принимаем в виде

$$P_1 = P_0, T_1 = T_0. \quad (8)$$

Параметры воздуха 1-й ступени в одном цикле:

— в процессе всасывания

$$P_{bc1} = P_{11} - \Delta P_{11}, \quad \Delta P_{11} = \begin{cases} \Delta P_{11} = \max(b \cdot d) \\ \Delta P_{11} = \text{const}(d - a) \end{cases};$$

$$T_{a1} = T_{d1}, V_{a1} = V_{d1}; \quad (9)$$

— в процессе сжатия

$$P \cdot V^{n_1} = R \cdot T_{11}, \quad n_1 = \begin{cases} n_1 > k(a - L), k = 1,4 \\ n_1 = k(b \cdot T.L) \\ 1 < n_1 < k(L - b) \end{cases};$$

$$T = T_{11} \cdot \pi_{k \text{ cm.1}}^{\frac{n_1-1}{n_1}}; \quad (10)$$

— в процессе нагнетания

$$P_{нат1} = P_{21} + \Delta P_{21}, \quad \Delta P_{21} = \begin{cases} \Delta P_{21} = \max(b \cdot T.b) \\ \Delta P_{21} = \text{const}(b - c) \end{cases};$$

$$T_{b1} = T_{c1}, V_{b1} = V_{c1}; \quad (11)$$

— в процессе расширения

$$P \cdot V^{n'_1} = R \cdot T_{11}, \quad n'_1 = \begin{cases} n'_1 < k(c - M), k = 1,4 \\ n'_1 = k(b \cdot T.M) \\ n'_1 > k(M - d) \end{cases};$$

$$T = T_{21} \cdot \left( \frac{1}{\pi_{k \text{ cm.1}}} \right)^{\frac{n'_1-1}{n'_1}}. \quad (12)$$

Граничные условия между 1-й и 2-й ступенями принимаем в виде

$$\Delta P_1 = P_1 - P'_1, T'_1 = T_0 + 5. \quad (13)$$

Параметры воздуха 2-й ступени в одном цикле принимаем:

— в процессе всасывания

$$P_{bc2} = P_{12} - \Delta P_{12}, \quad \Delta P_{12} = \begin{cases} \Delta P_{12} = \max(b \cdot T.d) \\ \Delta P_{12} = \text{const}(d - a) \end{cases};$$

$$T_{a2} = T_{d2}, V_{a2} = V_{d2}; \quad (14)$$

— в процессе сжатия

$$P \cdot V^{n_2} = R \cdot T_{12}, \quad n_2 = \begin{cases} n_2 > k(a - L), k = 1,4 \\ n_2 = k(b \cdot T.L) \\ 1 < n_2 < k(L - b) \end{cases};$$

$$T = T_{12} \cdot \pi_{k \text{ cm.2}}^{\frac{n_2-1}{n_2}}; \quad (15)$$

— в процессе нагнетания

$$P_{нат2} = P_{22} + \Delta P_{22}, \quad \Delta P_{22} = \begin{cases} \Delta P_{22} = \max(b \cdot T.b) \\ \Delta P_{22} = \text{const}(b - c) \end{cases};$$

$$T_{b2} = T_{c2}, V_{b2} = V_{c2}; \quad (16)$$

— в процессе расширения

$$P \cdot V^{n'_2} = R \cdot T_{12}, \quad n'_2 = \begin{cases} n'_2 < k(c - M), k = 1,4 \\ n'_2 = k(b \cdot T.M) \\ n'_2 > k(M - d) \end{cases};$$

$$T = T_{22} \cdot \left( \frac{1}{\pi_{k \text{ cm.2}}} \right)^{\frac{n'_2-1}{n'_2}}. \quad (17)$$

Граничные условия между 2-й и 3-й ступенями принимаем в виде

$$\Delta P_2 = P_2 - P'_2, T'_2 = T_0 + 10. \quad (18)$$

Параметры воздуха 3-й ступени в одном цикле принимаем:

— в процессе всасывания

$$P_{bc3} = P_{13} - \Delta P_{13}, \quad \Delta P_{13} = \begin{cases} \Delta P_{13} = \max(b \cdot T.d) \\ \Delta P_{13} = \text{const}(d - a) \end{cases};$$

$$T_{a3} = T_{d3}, V_{a3} = V_{d3}; \quad (19)$$

— в процессе сжатия

$$P \cdot V^{n_3} = R \cdot T_{13}, \quad n_3 = \begin{cases} n_3 > k(a - L), k = 1,4 \\ n_3 = k(b \cdot T.L) \\ 1 < n_3 < k(L - b) \end{cases};$$

$$T = T_{13} \cdot \pi_{k \text{ cm.3}}^{\frac{n_3-1}{n_3}}; \quad (20)$$

— в процессе нагнетания

$$P_{нат3} = P_{23} + \Delta P_{23}, \quad \Delta P_{23} = \begin{cases} \Delta P_{23} = \max(b \cdot T.b) \\ \Delta P_{23} = \text{const}(b - c) \end{cases};$$

$$T_{b3} = T_{c3}, V_{b3} = V_{c3}; \quad (21)$$

— в процессе расширения

$$P \cdot V^{n'_3} = R \cdot T_{13}, \quad n'_3 = \begin{cases} n'_3 < k(c - M), k = 1,4 \\ n'_3 = k(b \cdot T.M) \\ n'_3 > k(M - d) \end{cases};$$

$$T = T_{23} \cdot \left( \frac{1}{\pi_{k \text{ cm.3}}} \right)^{\frac{n'_3-1}{n'_3}}. \quad (22)$$

Граничные условия между 3-й и 4-й ступенями принимаем в виде

$$\Delta P_3 = P_3 - P_3', T_3' = T_0 + 15. \quad (23)$$

Параметры воздуха 4-й ступени в одном цикле принимаем:

— в процессе всасывания

$$P_{вс4} = P_{14} - \Delta P_{14}, \Delta P_{14} = \begin{cases} \Delta P_{14} = \max(\text{в т.д}) \\ \Delta P_{14} = \text{const}(d - a) \end{cases};$$

$$T_{a4} = T_{d4}, V_{a4} = V_{d4}; \quad (24)$$

— в процессе сжатия

$$P \cdot V^{n_4} = R \cdot T_{14}, n_4 = \begin{cases} n_4 > k(a - L), k = 1,4 \\ n_4 = k(\text{в т.д}) \\ 1 < n_4 < k(L - b) \end{cases};$$

$$T = T_{14} \cdot \pi_{k,cm.4}^{\frac{n_4-1}{n_4}}; \quad (25)$$

— в процессе нагнетания

$$P_{наг4} = P_{24} + \Delta P_{24}, \Delta P_{24} = \begin{cases} \Delta P_{24} = \max(\text{в т.д}) \\ \Delta P_{24} = \text{const}(b - c) \end{cases};$$

$$T_{b4} = T_{c4}, V_{b4} = V_{c4}; \quad (26)$$

— в процессе расширения

$$P \cdot V^{n_4'} = R \cdot T_{14}, n_4' = \begin{cases} n_4' < k(c - M), k = 1,4 \\ n_4' = k(\text{в т.д}) \\ n_4' > k(M - d) \end{cases};$$

$$T = T_{24} \cdot \left( \frac{1}{\pi_{k,cm.4}} \right)^{\frac{n_4'-1}{n_4'}}. \quad (27)$$

Параметры воздуха за компрессором принимаем в виде

$$\Delta P_4 = P_4 - P_4', T_4' = T_0 + 20. \quad (28)$$

Также необходимо учесть тот факт, что показатели политроп сжатия по ступеням неодинаковы из-за различного охлаждения цилиндров компрессора, так как с ростом номера ступени  $i$  уменьшается поверхность ее цилиндра, в то время как количество тепла, сообщаемое газу в процессе сжатия, по ступеням остается приблизительно одинаковым. Согласно [9, 10], величина эквивалентного показателя политропы сжатия первой ступени определяется по формуле:

$$n_{c1} = (0,92...0,98)k. \quad (29)$$

Вычисление показателей политроп последующих ступеней производим по формуле [11, 12]:

$$n_{ci} = n_{c1} + 0,015(i - 1)k. \quad (30)$$

Стоит отметить, что процесс сжатия и расширения разбивается на участки  $a-L-b$  и  $c-M-d$  с переменным показателем политропы  $n$  в уравнениях (10)–(12), в практических расчетах предлагается использовать единое значение  $n_{ci}$  в уравнениях (29)–(30). Это обусловлено тем, что:

— точное определение  $n$  в каждой точке требует сложных экспериментальных данных, которые не всегда доступны;

— для инженерных расчетов диагностики достаточно общего учета теплообмена через единое значение  $n_{ci}$ , рассчитанное по эмпирическим зависимостям.

Таким образом, разбиение на  $L$  и  $M$  отражает физическую суть процесса, а применение  $n_{ci}$  упрощает модель без значительной потери точности.

Таким образом, составленная математическая модель многоступенчатого ПК типа ЭКСА7,5-3М-1 включает в себя 23 системы уравнений (8)–(30).

Составление математической модели для конкретного компрессора требует определения его конструктивных параметров и оценки условий охлаждения.

На основе заводских данных о параметрах технически исправного компрессора с помощью приведенной выше математической модели возможно рассчитать процессы изменения таких параметров воздуха, как давление, объем и температура за один полный цикл работы компрессора. Характер изменения этих параметров в зависимости от угла поворота коленчатого вала можно вычислить для давления и объема, а для температуры — необходимость вычисления не возникает, так как, согласно уравнению состояния газа, при известных двух любых параметрах легко находится третий.

Таким образом, математическая модель ПК позволяет теоретически определить изменения давления и температуры воздуха за весь цикл для каждой ступени, а также сформировать показатели эталонного технически исправного ПК с дальнейшим применением при диагностировании различных неисправностей.

Своевременное обнаружение типовых неисправностей ПК [13] требует методов анализа, способных работать с нелинейными и нестационарными сигналами. В условиях эксплуатации и благодаря анализу сигналов методом частотно-временного анализа имеется возможность обнаружить типовые неисправности с выявлением их особенностей. Такую возможность, по мнению авторов [14], в полной мере может обеспечить преобразование Гильберта–Хуанга [15, 16].

Адаптивная природа метода, основанная на эмпирической модовой декомпозиции и спектральном анализе Гильберта, позволяет преодолеть ограничения традиционных частотно-временных методов, таких как быстрое и оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование или распределение Вигнера–Вилля при работе с нестационарными и нелинейными сигналами [17].

Один из традиционных способов сравнения сигналов (исследуемых сигналов, полученных с технически неисправного ПК) и некоторого эталона (сигналов исправного ПК, приближенных по значениям и рассчитанных с использованием приведенной выше математической модели) состоит в вычислении корреляционной функции [18].

Следует отметить, что целесообразным является сравнение спектров Гильберта в диапазонах частот, характеризующих их наиболее явные отличия. В качестве мер сходства эталона и исследуемого сигнала, получаемого при контроле диагностических параметров  $P$ ,  $V$  и  $T$  ПК, выбрана функция, подобная метрике Хаусдорфа, т. к. с ее помощью возможно улавливать редкие, но значимые аномалии, она устойчива к шуму, глобальным искажениям и совместима с нестационарными сигналами.

Ключевые преимущества предлагаемого подхода:

— возможность идентификации дефектов и неисправностей;

— точная локализация;

— адаптивность к реальным условиям эксплуатации.

Такой подход позволяет создать эффективную систему диагностики, сочетающую теоретическое моделирование и современные методы анализа сигналов.

### Выводы

Внедрение математической модели диагностики ПК на основе разложения процессов, образующих индикаторные диаграммы его ступеней, с дальнейшим сравнительным анализом полученных теоретических значений со значениями в условиях эксплуатации может найти широкое применение в системах технического диагностирования компрессорного оборудования и систем производства, хранения, распределения газов, обеспечивающих стартовые комплексы воздухом. Более того, это повысит надежность эксплуатации на космодромах гражданского и военного назначения. Реализация возможна с применением отечественных существующих аппаратных средств (контроллеров, датчиков, исполнительных устройств), используемых в современных системах автоматизированного управления компрессорного оборудования, а также путем наращивания дополнительных модулей и разработки специализированного программного обеспечения.

### Список источников / References

1. Чоккой С. А. Теоретическое исследование процесса диагностирования цилиндропоршневой группы тестовым методом // АПК России. 2024. Т. 31, № 2. С. 218–229. DOI: 10.55934/2587-8824-2024-31-2-218-229. EDN: HBKGMU.

Chokoy S. A. Teoreticheskoye issledovaniye protsessa diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy gruppy testovym metodom [Theoretical study of the diagnostic process of the cylinder-piston group by the test method]. APK Rossii. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2024. Vol. 31, no. 2. P. 218–229. DOI: 10.55934/2587-8824-2024-31-2-218-229. EDN: HBKGMU. (In Russ.).

2. Хейрабади Г., Мусави С. Техническое диагностирование и прогнозирование технического состояния оборудования // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 4–5(91). С. 157–164. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-4-5-157-164. EDN: JDABC.

Khayrabadi G., Musavi S. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Technical diagnosis and technical forecasting equipment condition]. Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. No. 4–5 (91). P. 157–164. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-4-5-157-164. EDN: JDABC. (In Russ.).

3. Мосейко Е. С. Оценка надежности судовых механических систем с учётом применения методов потенциальных отказов // Жизненный цикл конструкционных материалов. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. С. 307–314. EDN: CTSGNZ.

Moseiko E. S. Otsenka nadezhnosti sudovykh mekhanicheskikh sistem s uchetom primeneniya metodov potentsial'nykh otkazov // Zhiznennyy tsikl konstruksionnykh materialov. *Life Cycle of Structural Materials*. Irkutsk, 2022. P. 307–314. EDN: CTSGNZ. (In Russ.).

4. Оскома А. А., Суриков Д. Г. Формирование модели диагностирования SKAB-7,5 на основе вектора его диагностических параметров // Вестник Международной академии

холода. 2021. № 4. С. 30–37. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-30-37. EDN: AUQLDG.

Oskoma A. A., Surikov D. G. Formirovaniye modeli diagnostirovaniya SKAV-7,5 na osnove vektora ego diagnosticheskikh parametrov [Model for diagnosing SKAB-7.5 on the basis of the vector for its diagnosing parameters]. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No. 4. P. 30–37. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-30-37. EDN: AUQLDG. (In Russ.).

5. Зимарев А. В., Сафронов К. С. Моделирование работы воздушного компрессора // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2021. № 1-1. EDN: AWRXAU.

Zimarev A. V., Safronov K. S. Modelirovaniye raboty vozdušnogo kompressora [Simulation of the operation of an air compressor]. Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta. *Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University*. 2021. № 1-1. EDN: AWRXAU. (In Russ.).

6. Ковалев И. В., Ковалев Д. И., Лосев В. В. [и др.]. Математическое моделирование и алгоритмизация функций мониторинга технологических процессов на основе многоточечных измерительных систем // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6-1. С. 29–38. DOI: 10.17513/snt.38693. EDN: ERYLYC.

Kovalev I. V., Kovalev D. I., Losev V. V. [et al.]. Matematicheskoye modelirovaniye i algoritimizatsiya funktsiy monitoringa tekhnologicheskikh protsessov na osnove mnogotochechnykh izmeritel'nykh sistem [Mathematical modeling and algorithmization of technological processes monitoring functions based on multi-point measuring systems]. Sovremennyye naukoemye tekhnologii. *Modern High Technologies*. 2021. No. 6-1. P. 29–38. DOI: 10.17513/snt.38693. EDN: ERYLYC. (In Russ.).

7. Ходырев А. И., Шахов А. В. Математическое моделирование неисправностей ступени поршневого компрессора в целях технического диагностирования // Территория Нефтегаз. 2020. № 1-2. С. 46–54. EDN: FSNQDW.

Khodyrev A. I., Shakhov A. V. Matematicheskoye modelirovaniye neispravnostey stupeni porshnevoego kompressora v tselyakh tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Mathematical simulation of reciprocating compressor stage defects for technical diagnosis]. Territoriya Neftegaz. 2020. No. 1-2. P. 46–54. EDN: FSNQDW. (In Russ.).

8. Хайруллин Б. А. Прогнозирование удельной ошибки расчёта распределения термобарического состояния газоконденсата при выборе уравнения состояния реального газа // Оригинальные исследования. 2022. Т. 12, № 5. С. 163–173. EDN: ZNZKCS.

Khayrullin B. A. Prognozirovaniye udel'noy oshibki rascheta raspredeleniya termobaricheskogo sostoyaniya gazokondensata pri vybere uravneniya sostoyaniya real'nogo gaza [Prediction of the specific error in calculating the distribution of the thermobaric state of a gas condensate when choosing the equation of state of a real gas]. Original'nyye issledovaniya. *Original Research*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 163–173. EDN: ZNZKCS. (In Russ.).

9. Юша В. А., Сутягинский М. А., Потапов Ю. А., Русских Г. С. Адаптация системы регулирования производительности технологического поршневого водородного компрессора к нестабильным условиям эксплуатации // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 29–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-29-35. EDN: YBXSXR.

Yusha V. A., Sutyaginskii M. A., Potapov Yu. A., Russkikh G. S. Adaptatsiya sistemy regulirovaniya proizvoditel'nosti tekhnologicheskogo porshnevoego vodorodnogo kompressora k nestabil'nyim usloviyam ekspluatatsii [Adaptation of the performance control system of a technological piston hydrogen compressor to unstable operating conditions]. Omskii nauchnyi vestnik. *Seriya Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe*

mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 29–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-29-35. EDN: YYBXSX. (In Russ.).

10. Лихачев В. Г. Судовые вспомогательные механизмы и системы. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 256 с. ISBN 978-5-507-45027-5.

Likhachev V. G. Sudovyye vspomogatel'nyye mekhanizmy i sistemy [Vessel auxiliary mechanisms and systems]. Saint Petersburg, 2023. 256 p. ISBN 978-5-507-45027-5. (In Russ.).

11. Щерба В. Е. Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия. 2-е изд., доп. Москва: Юрайт, 2019. 323 с. ISBN 978-5-534-09232-5. EDN: QWCJGO.

Shcherba V. E. Teoriya, raschet i konstruirovaniye porshnevyykh kompressorov ob'emnogo deistviya [Theory, calculation and design of volumetric reciprocating compressors]. 2nd ed., expanded. Moscow, 2019. 323 p. ISBN 978-5-534-09232-5. EDN: QWCJGO. (In Russ.).

12. Юша В. А. Анализ термодинамической эффективности теоретического многоступенчатого компрессора с комбинированным применением адиабатного, изотермического и субизотермического процессов сжатия // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-29-38. EDN: WWAYGR.

Yusha V. A. Analiz termodinamicheskoy effektivnosti teoreticheskogo mnogostupenchatogo kompressora s kombinirovannym primeneniym adiabatnogo, izotermicheskogo i subizotermicheskogo protsessov szhatiya [Analysis of the thermodynamic efficiency of a theoretical multi-stage compressor with the combined use of adiabatic, isothermal and subisothermal compression processes]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya Aviatsonno-raketnoe i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-29-38. EDN: WWAYGR. (In Russ.).

13. Бураков А. В., Хотский Р. Р., Кузнецов Л. Г. Выбор и изучение способов реализации модели диагностирования компрессорных станций ракетно-космического комплекса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С. 72–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-72-82. EDN: JRHMTO.

Burakov A. V., Khotksy R. R., Kuznetsov L. G. Vybor i izucheniye sposobov realizatsii modeli diagnostirovaniya kompressornykh stantsiy raketno-kosmicheskogo kompleksa [Selection and study of methods for implementing a diagnostic model for compressor stations of the rocket and space complex]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 72–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-72-82. EDN: JRHMTO. (In Russ.).

14. Хотский Р. Р., Макшанов А. В., Бураков А. В. [и др.]. Диагностика неисправностей судовых поршневых компрессоров с использованием преобразования Гильберта–Хуанга // Морской вестник. 2025. № 1 (93). С. 71–75. EDN: JVLHQR.

Khotksiy R. R., Makshanov A. V., Burakov A. V. [et al.]. Diagnostika neispravnostey sudovykh porshnevyykh kompressorov s ispol'zovaniym preobrazovaniya Gil'berta–Khuanga [Diagnostics of malfunctions of marine piston compressors by the Hilbert-Huang transformation]. *Morskoy Vestnik*. 2025. No. 1 (93). P. 71–75. EDN: JVLHQR. (In Russ.).

15. Huang N., Shen Zh., Long S. [et al.]. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Vol. 454. P. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.

16. Вознесенский А. С., Шестопалов М. Ю., Миненков Д. В. [и др.]. Частотно-временной анализ сигналов с ис-

пользованием алгоритмов EMD, ITD и VMD // Инженерный вестник Дона. 2024. № 10 (118). С. 15–35. EDN: HSLXAC.

Voznesenskiy A. S., Shestopalov M. Yu., Minenkov D. V. [et al.]. Chastotno-vremennoy analiz signalov s ispol'zovaniym algoritmov EMD, ITD i VMD [Time-frequency analysis of signals using EMD, ITD AND VMD algorithms]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2024. No. 10 (118). P. 15–35. EDN: HSLXAC. (In Russ.).

17. Саксонов Е. А., Симонов С. Е., Городничев М. Г. Обзор методов обнаружения неисправностей синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4 (100). С. 8–38. EDN: ZAMMDU.

Saksonov E. A., Simonov S. E., Gorodnichev M. G. Obzor metodov obnaruzheniya neispravnostey sinkhronnogo elektrodvigatelya s postoyannymi magnitami [Review of methods for detecting faults in a permanent magnet synchronous motor]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2023. No. 4 (100). P. 8–38. EDN: ZAMMDU. (In Russ.).

18. Загреддинов А. Р., Гапоненко С. О., Серов В. В. Концепция оценки технического состояния оборудования на основе ННТ-преобразования виброакустических сигналов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3 (37). С. 16. EDN: VHSANB.

Zagretidinov A. R., Gaponenko S. O., Serov V. V. Kontseptsiya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya na osnove NNT-preobrazovaniya vibroakusticheskikh signalov [The concept of evaluation technical condition with NNT-transform vibro-acoustic signals]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2015. No. 3 (37). P. 16. EDN: VHSANB. (In Russ.).

**ХОТСКИЙ Ростислав Ростиславович**, заместитель начальника 808 военного представительства МО РФ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5240-0228

AuthorID (РИНЦ): 1234008

ORCID: 0009-0002-7064-1279

Адрес для переписки: hotsky\_slava@mail.ru

**БУРАКОВ Александр Васильевич**, начальник ЦКБ АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 8501-1234

AuthorID (РИНЦ): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

ORCID: 0000-0002-3553-2854

Адрес для переписки: 47otdel@compressor.spb.ru

**КУЗНЕЦОВ Леонид Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3819-4361

AuthorID (РИНЦ): 359074

ResearcherID: A-8766-2018

Адрес для переписки: office@compressor.spb.ru

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 25.07.2025; принята к публикации 28.08.2025.

**KHOTSKY Rostislav Rostislavovich**, Deputy Head of the 808 Military Representative Office of the Russian Defense Ministry, Saint Petersburg.

SPIN-code: 5240-0228

AuthorID (RSCI): 1234008

ORCID: 0009-0002-7064-1279

Correspondence address: hotsky\_slava@mail.ru

**BURAKOV Aleksandr Vasilyevich**, Head of the Central Design Bureau, JSC "Compressor", Saint Petersburg.

SPIN-code: 8501-1234  
AuthorID (RSCI): 994917  
AuthorID (SCOPUS): 57210981312  
ORCID: 0000-0002-3553-2854  
Correspondence address: 47otdel@compressor.spb.ru  
**KUZNETSOV Leonid Grigorievich**, Doctor of  
Technical Sciences, Professor, General Designer, JSC  
"Compressor", Saint Petersburg.  
SPIN-code: 3819-4361  
AuthorID (RSCI): 359074

ResearcherID: A-8766-2018  
Correspondence address: office@compressor.spb.ru

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 15.04.2025; approved after reviewing 25.07.2025; accepted for publication 28.08.2025.