



ВЫБОР И ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

А. В. Бураков¹, Р. Р. Хотский², Л. Г. Кузнецов¹

¹АО «Компрессор», Россия, 194044, г. Санкт-Петербург,
пр. Большой Сампсониевский, 64

²808 военное представительство МО РФ,
Россия, 192012, г. Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, 123

В статье в качестве объекта диагностирования рассматривается система сжатого воздуха, входящая 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 анализе характерных неисправностей. Разработаны векторы состояния элементов системы сжатого воздуха на основе множества структурных параметров, характеризующих техническое состояние объекта диагностирования. Предложено использовать вейвлет-анализ для обработки диагностических параметров полученных при анализе индикаторных диаграмм ступеней поршневого компрессора.

Ключевые слова: поршневой компрессор, индикаторная диаграмма, ряды Фурье, вейвлет-анализ, модель диагностирования, диагностические параметры, техническая диагностика.

Введение

АО «Компрессор» является разработчиком и изготовителем специализированных судовых компрессорных установок, а также систем и изделий для производства, хранения и распределения сжатого воздуха, которые используются на космодромах «Байконур», «Плесецк» и «Восточный».

В настоящее время роль системы сжатого воздуха (ССВ) на космодромах гражданского и военного назначения возрастает в связи с необходимостью обеспечения постоянной боевой готовности. Особое место занимают комплексы компрессорного оборудования и систем для производства, хранения, распределения газов для космодромов, обеспечивающих стартовые комплексы воздухом высокого, среднего и низкого давления (ВВД, ВСД и ВНД) и запуск ракет-носителей [1].

Таким образом, система сжатого воздуха является сложной технической системой (СТС), соединяющей в себе большое количество функционально связанных элементов, играет существенную роль в обеспечении боевой и повседневной эксплуатации космических комплексов. В то же время она является одной из наименее изученных с точки зрения внедрения методов и средств диагностирования наземных аэрокосмических систем [2]. Эти два обстоятельства подчеркивают актуальность изучаемого вопроса.

Основная часть

Основным элементом ССВ любой системы сжатого воздуха является компрессор. Объектом исследования является современная станция компрессорная автоматизированная СКА 60/200, созданная в рамках поставки для универсального десантного

корабля-вертолетоносца (УДК) проекта 23900. Проведены квалификационные испытания и выполнена постановка на производство под контролем ВП МО РФ [3].

Станция широко используется в качестве элемента ССВ надводных кораблей, однако широкий диапазон рабочих параметров по давлению и производительности, хорошие массогабаритные характеристики с учетом размещения всех элементов на единой раме, обеспечение требований по ударостойкости [4] позволяют рассматривать станцию СКА 60/200 для применения в составе системы сжатого воздуха (ССВ) на космодромах гражданского и военного назначения.

Станция компрессорная автоматизированная СКА 60/200 приведена на рис. 1.

Термин «техническое диагностирование» (ТД) в соответствии с действующим государственным стандартом [5] можно трактовать как «определение технического состояния объекта технического диагностирования».

В качестве объекта технического диагностирования в данной статье принимается непосредственно изделие в целом и элементы, из которых состоит указанное изделие, в частности.

В качестве основных задач, возлагаемых на ТД, рассмотрим:

- контроль технического состояния объекта;
- поиск места неисправности;
- определение причин неисправности;
- прогнозирование состояния объекта.

Задачи, которые необходимо выполнять с помощью системы технического диагностирования (СТД), определяются структурой объекта технического диагностирования (ТД) и особенностями его технического обслуживания (ТО). В общем случае можно выделить две основные задачи:



Рис. 1. Станция компрессорная автоматизированная
СКА 60/200

Fig. 1. SKA 60/200 automated compressor station

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 [6]. Особенностью эксплуатации объекта с развитой блочной структурой является сложность определения вышедшего из строя элемента (блока) при потере работоспособности объекта. Восстановление работоспособности здесь осуществляется путем замены вышедшего из строя элемента на новый. К таким объектам относятся различные радиотехнические средства, системы автоматического управления и т.п.

Для механических объектов, подобных компрессорам, наиболее важным является решение второй задачи [7]. Знание текущего технического состояния таких объектов без их разборки (согласно опыту проведения работ по государственным контрактам предприятия с Министерством обороны Российской Федерации по техническому обслуживанию на всех этапах жизненного цикла широкой номенклатуры компрессорного оборудования, эксплуатируемого на объектах ВМФ) дает возможность оптимально планировать ремонт и проводить своевременные профилактические работы, отказаться от регламентных переборок 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 комплекта запасных частей и принадлежностей изделия (ЗИП).

Выбор системы ТД применительно к различным станциям компрессорным автоматизированным типа СКА, СКАВ и аналогичных, основан на изучении наиболее часто встречающихся случаев выходов из строя компрессорных станций в процессе их использования по прямому назначению, с учетом вычислительных возможностей программируемых логических контроллеров, применяющихся в составе приборов управления и позволяющих реализовывать сложные алгоритмы измерения ряда технических параметров в процессе применения компрессорной станции по прямому назначению.

Выполненный анализ существующих работ [8–12], а также статистических данных (журналы учета полученных рекламаций предприятий АО НПО «Компрессор» и АО «Компрессор» за период с 2017 по 2024 годы) о выявленных случаях выхода из строя компрессорных станций позволяет сделать вывод о том, что наиболее часто встречающиеся неисправности поршневых компрессоров (ПК) связаны с нарушениями в работе всасывающих и нагнетательных клапанов, поршней (поршневых колец) в цилиндрах (в ЦПГ), шатунов и коленчатого вала (в КШМ), а также с нарушениями в работе систем охлаждения и смазки.

При работе СКА60/200 технически возможно измерять и анализировать посредством программируемого логического контроллера, входящего в штатный прибор управления (локальный измерительный комплекс), основные параметры компрессорных станций: давление на выходе I, II, III, IV ступени компрессора; температуру воздуха на выходе I, II, III, IV ступени; давление на входе и выходе охлаждающей воды; температуру на входе и выходе охлаждающей воды; давление в системе смазки; температуру в системе смазки; давление воздуха в адсорберах блока осушки; точку росы (влажность) воздуха на выходе из блока осушки воздуха, которые будем использовать как диагностические параметры (далее ДП).

На основании данных показателей сформирован вектор диагностических параметров, в составе которого используются контролируемые параметры, отвечающие следующим требованиям:

- 1) независимость параметров между собой;
- 2) возможность их прямого замера;
- 3) связь измеряемых параметров со структурными, которые характеризуют состояние компрессорной станции;
- 4) возможность определения по выделенным параметрам условий работоспособности и правильного функционирования компрессорной станции.

Анализируя характерные неисправности ПК, делаем выводы о необходимости выявления структурных параметров, характеризующих состояние следующих элементов:

- 1) для элемента ЦПГ в качестве структурных параметров принимаем:

- величину зазоров между поршнем и цилиндром;
- величину уменьшения диаметра поршневых колец вследствие износа;

- 2) для элемента КШМ в качестве структурных параметров принимаем:

- величину зазоров между диаметрами коренных подшипников и коренными шейками коленчатого вала;

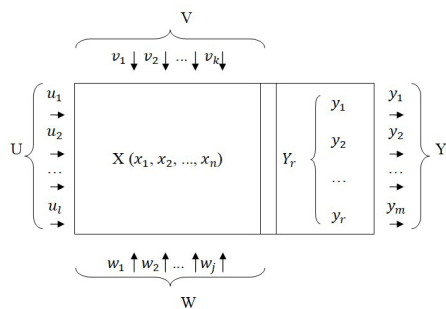


Рис. 2. Модель диагностирования поршневого компрессора
Fig. 2. Piston compressor diagnostic model

— величину зазоров между шатунами и шатунной шейкой коленчатого вала;

3) для элементов «Самодельные клапаны (СК)» в качестве структурных параметров принимаем:

— величину зазора между седлом клапана и пластиной;

— снижение жесткости пружины клапана;

— уменьшение размеров пластины клапана;

4) для элемента «Система охлаждения компрессора» в качестве структурных параметров принимаем:

— величину зазоров между корпусом водяного насоса и рабочим колесом;

— увеличение гидравлического сопротивления (вследствие засорения) холодильников ступеней;

5) для элемента «Система смазки компрессора» в качестве структурных параметров принимаем:

— величину зазоров между корпусом и шестеренками в масляном насосе;

— величину зазора между диаметром сальника подшипника и диаметром вала в масляном насосе.

Таким образом, возможно решить задачи определения неисправностей элементов компрессора в процессе его функционирования; прогнозирования этих неисправностей; определения работоспособности механизма в целом. Наименьший перечень параметров, положенных в основу формирования вектора ДП, сформирован на базе возможностей штатного контрольно-измерительного комплекса (КИК), а также рекомендаций известных методов диагностирования [13–16].

Выбор модели диагностирования

Модель диагностирования поршневого компрессора (ПК) на основе вектора его динамических параметров описана в работах [7, 17] и изображена на рис. 2, где: $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество структурных параметров, характеризующее техническое состояние объекта диагностирования;

$Y_r \{y_1, y_2, \dots, y_r\}$ — множество измеряемых параметров штатным КИК;

$Y \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ — перечень диагностических параметров, связанных со структурными параметрами $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

$U \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ — управляющие воздействия;

$V \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ — контролируемые внешние факторы;

$W \{w_1, w_2, \dots, w_j\}$ — неконтролируемые воздействия.

Состояние объекта диагностирования — непосредственно компрессора в сборе и элементов, из которых он состоит, — характеризуется множе-

ством структурных параметров $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Для ПК станции компрессорной СКА60/200 множество параметров может быть представлено в виде

$$X \{x_1, x_2, \dots, x_9\}, \quad (1)$$

где x_1 — разница диаметров поршня и цилиндра;

x_2 — разница диаметров поршневых колец до и после работы компрессора;

x_3 — разница между диаметрами коренного подшипника и коренной шейки коленчатого вала;

x_4 — разница между диаметрами шатунов и шатунной шейки коленчатого вала;

x_5 — разница между размерами седла и пластины клапана;

x_6 — разница жесткости пружины клапана до и после работы компрессора;

x_7 — разница толщин пластин клапанов до и после работы компрессора;

x_8 — разница между шириной корпуса и шириной шестеренок в масляном насосе;

x_9 — разница между диаметрами сальника подшипника и вала в масляном насосе.

Множество параметров Y_r компрессорной станции, подвергается контролю,

$$Y_r \{y_1, y_2, \dots, y_r\}. \quad (2)$$

Множество Y_r (2) ограничено, прежде всего, количеством контрольно-измерительных приборов (КИП) и вычислительными возможностями промышленного логического контроллера, входящего в состав контрольно-измерительного комплекса (КИК) в штатной системе автоматического управления компрессорной станции СКА60/200.

Требуется выбрать на базе Y_r перечень независимых друг от друга, доступных для непосредственного измерения диагностических параметров, которые должны быть и функционально связаны с множеством структурных параметров X ПК станции компрессорной СКА60/200.

Множество Y_r для исследуемой компрессорной станции СКА60/200 включает в себя 18 параметров (т.е. $r = 18$):

- 1 — давление в I ступени ПК;
- 2 — давление во II ступени ПК;
- 3 — давление в III ступени ПК;
- 4 — давление в IV ступени ПК;
- 5 — температура воздуха на входе в I ступень ПК;
- 6 — температура воздуха на выходе из I ступени ПК;
- 7 — температура воздуха на входе во II ступень ПК;
- 8 — температура воздуха на выходе из II ступени ПК;
- 9 — температура воздуха на входе в III ступень ПК;
- 10 — температура воздуха на выходе из III ступени ПК;
- 11 — температура воздуха на входе в IV ступень ПК;
- 12 — температура воздуха на выходе из IV ступени ПК;
- 13 — давление воды на входе в систему охлаждения ПК;
- 14 — давление воды на выходе системы охлаждения ПК;
- 15 — температура воды на выходе системы охлаждения ПК;

16 — давление масла на выходе масляного насоса ПК;

17 — температура масла в масляном баке ПК;

18 — давление воздуха на выходе из ПК (на выходе из блока осушки).

На основании уравнения состояния и расчёта производительности относительно стандартных условий можно получить следующее соотношение:

$$\frac{V_k}{V_{ст}} = \frac{P_{ст}}{P_k(T_k/T_{ст})} \cdot 60. \quad (3)$$

Используя выражение для отношения давлений $\left(\pi_{к.ст.} = \frac{P_{к.ст.}}{P_{н.ст.}}\right)$, возможно вычисление всех термодинамических параметров, следовательно, в качестве диагностического параметра ЦПГ i -ой ступени принимаем отношение давлений в ступени, т.е. $y_1 = \pi_{ст.1}, \dots, y_4 = \pi_{ст.4}$.

В поршневом компрессоре работоспособность КШМ определяется величиной зазоров между шатунами и шатунной шейкой коленчатого вала: y_5 .

Работа самодействующих клапанов в I, II, III, IV ступенях компрессора характеризуется значением перепада давлений в I, II, III, IV ступенях. Значения перепада давления в I, II, III, IV ступенях может быть определено расчетом через $\pi_{ст.i}$, т.е. через $y_1, \dots, y_4$.

После I, II, III, IV ступеней компрессора установлены соответствующие охладители воздуха типа «воздух–вода». Качество работы охладителей I, II, III, IV ступеней однозначно могут характеризоваться температурой на входе–выходе и значением разницы давления воды на входе и на выходе из соответствующего охладителя. Значение разницы давления показывает гидродинамическое сопротивление водяных полостей холодильников и водяных полостей охлаждения компрессора, а на основании разности температуры можно судить о качестве охлаждения воздуха в холодильниках после I, II, III, IV ступеней компрессора. На основании вышеизложенного значения перепада давления и температуры воды в системе охлаждения используем как диагностические параметры компрессора — y_6 и y_7 .

Для проверки правильности работы системы смазки в компрессоре необходимо контролировать температуру и давление масла, поэтому значение давления на масляном насосе y_8 , которое характеризует работоспособность насоса и значение температуры масла в баке компрессора y_9 , которое характеризует качество охлаждения масла, используем как диагностические параметры.

Учитывая период испытаний и эксплуатации станции СКА60/200 и аналогичных компрессорных станций, можно сделать вывод об основных элементах, состояние которых влияет на выход из строя компрессора:

- поршневые кольца;
- поршни;
- втулки цилиндров;
- всасывающие и нагнетательные клапаны;
- межступенчатые теплообменники;
- коренные подшипники коленчатого вала;
- масляный насос;
- водяной насос.

Поэтому для оптимальной оценки работоспособности данные параметры целесообразно контролировать.

На основании вышеизложенного выбираем базовый список диагностических параметров СКА60/200, которые характеризуются вектором $Y = \{y_m\}$ при $m = 1, 2, \dots, 9$.

$$Y_r \{y_1, y_2, \dots, y_9\}, \quad (4)$$

где y_1 — степень сжатия в I ступени ПК;

y_2 — степень сжатия во II ступени ПК;

y_3 — степень сжатия в III ступени ПК;

y_4 — степень сжатия в IV ступени ПК;

y_5 — разница между диаметрами шатунов и шейками вала;

y_6 — давление воды на выходе из холодильников системы охлаждения;

y_7 — температура воды на выходе из холодильников системы охлаждения;

y_8 — давление на выходе масляного насоса компрессора;

y_9 — температура масла в масляном баке компрессора.

Выбор вектора диагностических параметров (ВДП) Y и описание их связи со структурными параметрами X приведен, учитывая также воздействие факторов, которые можно представить в виде трех множеств:

$$U \{u_1, u_2, \dots, u_l\}, V \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, W \{w_1, w_2, \dots, w_j\}.$$

Множества, характеризующие внешние воздействующие факторы:

$U \{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ — воздействия, оказываемые на объект от окружающей среды (u_1 — температура окружающей среды, u_2 — относительная влажность, u_3 — атмосферное давление);

$V \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ — механические воздействия на компрессор (v_1 — механический удар, v_2 — воздействие вибрации, v_3 — землетрясение);

$W \{w_1, w_2, \dots, w_j\}$ — воздействия на компрессор со стороны органов управления (w_1 — включение и отключение, w_2 — воздействие от некорректного включения, w_3 — воздействие от некорректного выполнения алгоритма управления).

Ввиду сложности сбора статистических данных отсутствует возможность определения степени влияния указанных внешних факторов на зависимость между диагностическими и структурными параметрами. Расчетные методы диагностической модели, имеющие возможность учета влияния внешних факторов применительно к поршневым компрессорам, отсутствуют или имеют низкую точность.

Для выбора оптимальной для поршневого компрессора модели диагностирования изучим существующие методы диагностики и способы их реализации.

Индикаторная диаграмма была разработана Джеймсом Уаттом и его сотрудником Джоном Саутером еще в 1796 году, чтобы понять, как повысить эффективность паровых двигателей. Индикаторная диаграмма компрессора — это графическая зависимость давления в цилиндре компрессора от переменного объема газа в цилиндре. По ней можно определить индикаторный объемный коэффициент, показатели политроп процессов сжатия и обратного расширения и другие параметры, характеризующие работу компрессора, поэтому принимаем индикаторную диаграмму ступени компрессора в качестве диаграммы состояния работы ступени компрессора.

В общем виде анализ неисправностей с помощью диаграмм состояния представлен на рис. 3–5.

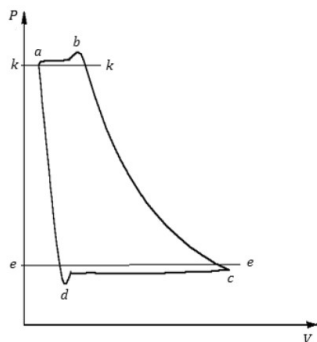


Рис. 3. Построенная по параметрам работы в штатном режиме диаграмма работы ступени компрессора SKA60/200

Fig. 3. Diagram of the SKA60/200 compressor stage operation based on normal operation parameters

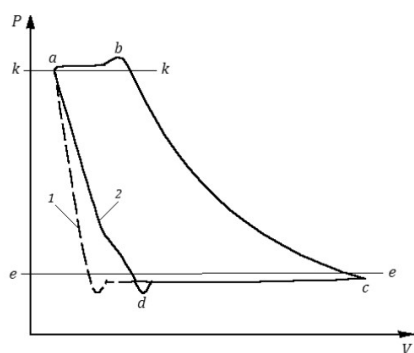


Рис. 4. Диаграмма работы ступени компрессора SKA60/200 с увеличенным мертвым пространством: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 4. Diagram of SKA60/200 compressor stage operation with increased blind space: 1 — cylinder in proper condition; 2 — fault in cylinder

На рис. 3 представлена диаграмма состояния ступени компрессора SKA60/200 при штатной его работе.

На рис. 4 и 5 представлены диаграммы состояния с различными видами неисправностей.

На рис. 3 представлена идеальная диаграмма состояния ступени нового компрессора, где $d-c$ — процесс, в котором давление всасывания выше атмосферного давления ($e-e$); $b-a$ — процесс, в котором нагнетание проходит выше давления в нагнетательном трубопроводе ($k-k$); $a-d$ — процесс расширения воздуха, оставшегося во вредном пространстве.

На рис. 4 представлена диаграмма состояния компрессора, имеющего слишком большое вредное пространство. Линия расширения воздуха, оставшегося во вредном пространстве $a-d$, отклонилась вправо от нормального положения, и фактическая длина линии всасывания $d-c$ меньше нормальной линии всасывания.

На диаграмме состояния компрессора, представленной на рис. 5, в начале и в конце процесса сжатия и процесса всасывания имеются отклонения. Данное отклонение свидетельствует о наличии неплотности во всасывающих и нагнетательных клапанах.

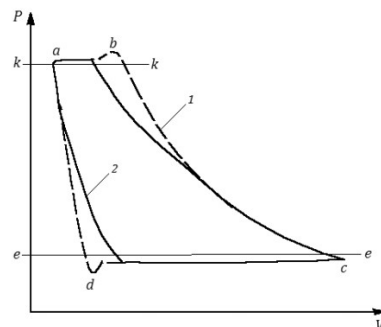


Рис. 5. Диаграмма работы ступени компрессора SKA60/200, имеющей неплотности клапанов: 1 — клапаны в исправном состоянии; 2 — наличие неплотностей в клапанах

Fig. 5. Operation diagram of SKA60/200 compressor stage with leaky valves: 1 — valves in proper condition; 2 — presence of leaky valves

В качестве варианта метода диагностирования возможно применение метода с использованием анализа диаграммы состояния ступени компрессора с разложением её в ряд Фурье [17].

В настоящее время авторы данной статьи ведут исследования по использованию вейвлет-преобразований для обработки диагностических параметров, полученных посредством анализа индикаторных диаграмм ступеней ПК, так как вейвлет-анализ не оставляет «хвостов» и образует значительно меньше коэффициентов, чем разложение в ряды Фурье.

Теория вейвлетов в ряде случаев может использоваться в качестве альтернативы анализу с разложением в ряд Фурье, так как упрощает обработку коэффициентов, которые применяются в качестве диагностических параметров поршневого компрессора. Одним из ключевых особенностей вейвлет-анализа является то, что с его помощью можно достоверно определить изменения локализованных диагностических параметров и, соответственно, получить более точный анализ технического состояния ПК, в то время как анализ с разложением в ряд Фурье не позволяет этого сделать в связи с тем, что в коэффициентах Фурье определяется изменение диагностических параметров за все время его существования.

Изучим применение диаграмм состояния ступени компрессора для диагностики ПК.

Диаграмма состояния ступени поршневого компрессора своими значениями и геометрией определяет функциональную зависимость между структурными параметрами, характеризующими техническое состояние компрессора и его ступеней и диагностическими измеряемыми параметрами, характеризующими термодинамические процессы. Причем геометрия измеренной диаграммы построена уже с учетом внешних воздействий и требует аналитического расчета.

Поэтому диаграмма состояния ступени компрессора, построенная с необходимым по точности разрешением, может являться диагностической моделью, которая определяет взаимосвязь между структурными параметрами, характеризующими фактическое техническое состояние ступеней компрессора, и диагностическими параметрами, характеризующими физические процессы, происходящие в каждой ступени ПК.

В связи с вариативностью диагностических и структурных параметров во времени возможно представить зависимости, определяющие процессы диаграммы состояния ступени компрессора, в виде графических зависимостей от времени, имеющих в ПК периодический характер. Данный способ направлен на решение следующих проблем:

1) введением в состав ДП коэффициентов временного ряда для повышения скорости диагностирования элементов ПК, что позволяет использовать возможность не только качественной, но и количественной оценки изменения как самих диагностических параметров на уровне их математических ожиданий, так и их корреляционных связей.

Для диагностики судовых дизельных двигателей, например, используется эффект изменения корреляционных связей, который происходит перед изменением параметров, характеризующих его работу [18];

2) выражение процессов диаграммы состояния ступени компрессора в виде графических зависимостей от времени с использованием выборки контролируемых параметров определенного диапазона позволяет решать задачу прогнозирования изменения состояния этого временного ряда, а значит, технического состояния ПК.

При рассмотрении в качестве объекта диагностирования всей ССВ первый блок ее вектора состояния принимается в виде вектора состояния СКА60/200. Он дополняется вторым блоком, характеризующим техническое состояние остальных элементов системы.

Контроль работоспособности системы сжатого воздуха

Рассматривая ССВ как СТС, определим множество структурных параметров $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ основных её элементов:

- блок осушки и очистки воздуха БО60/200;
- редукционные клапаны;
- воздушный редуктор;
- баллоны;
- трубопроводы сжатого воздуха.

Определение работоспособности ССВ и её элементов осуществляется на основе анализа её характерных неисправностей.

Блок осушки и очистки воздуха БО60/200 (рис. 6) является автоматизированным, поэтому при возникновении предаварийного состояния система автоматики сама отключит блок, о чем появится соответствующее сообщение на пульте управления ПУ СКА60/200 [19] (рис. 7). Однако штатная система автоматики не позволяет контролировать изменение технического состояния основных элементов блока и, соответственно, прогнозировать его остаточный ресурс. Эта проблема может быть решена, если вектор диагностических параметров блока и тенденция его изменения будут контролироваться и анализироваться общей системой технического диагностирования компрессорной станции.

Вектор состояния блока осушки и очистки воздуха БО60/200 будет иметь вид

$$X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots\}, \quad (5)$$

где $x_{1,1}$ — давление воздуха за фильтрами тонкой очистки;

$x_{1,2}$ — влагосодержание воздуха на выходе из БОО;

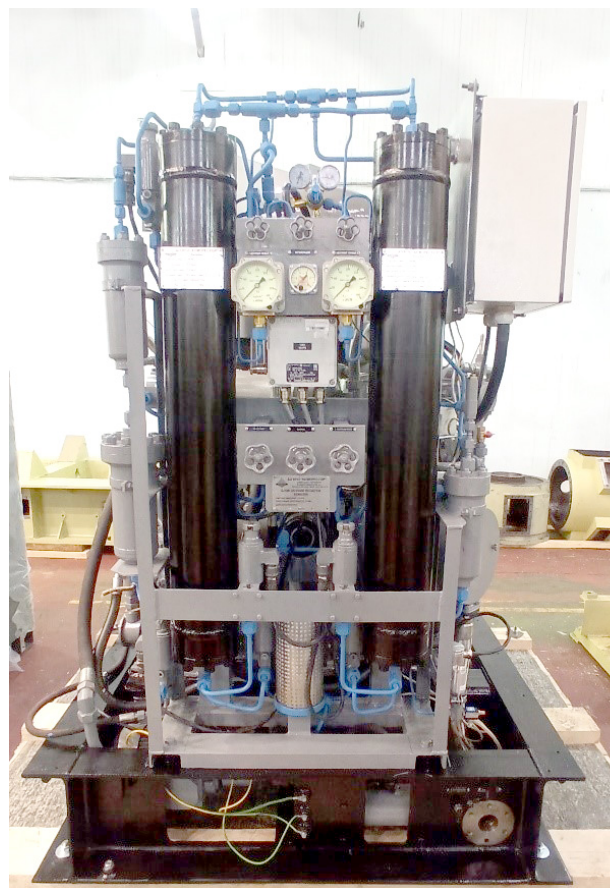


Рис. 6. Общий вид блока осушки и очистки воздуха БО60/200

Fig. 6. General view of the BO60/200 dehumidification and air purification unit



Рис. 7. Пульт управления ПУ СКА60/200
Fig. 7. PU SCA60/200 control panel

$x_{1,3}$ — давление воздуха за БОО;
 $x_{1,4}$ — давление воздуха до фильтров тонкой очистки;

$x_{1,5}$ — давление воздуха перед БОО;

$x_{1,6}$ — давление в адсорберах БОО.

Порядок определения работоспособности и характерных неисправностей электромагнитных клапанов и регулятора давления приведен в руководстве по эксплуатации СКА60/200.

На основании указанных данных вектор состояния электромагнитных клапанов будет иметь вид

$$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, \dots\}, \quad (6)$$

где $x_{2,1}$ — давление на входе в электромагнитный клапан;

$x_{2,2}$ — давление на выходе из электромагнитного клапана.

Вектор состояния регулятора давления принимает следующий вид

$$X_3 = \{x_{3,1}, x_{3,2}, \dots\}, \quad (7)$$

где $x_{3,1}$ — давление на входе в регулятор давления;

$x_{3,2}$ — давление на выходе редуктора давления.

На базе анализа наиболее распространенных причин выходов из строя баллонов для хранения воздуха и анализа известных методов диагностирования [20] вектор состояния баллонов воздуха высокого давления примет вид

$$X_4 = \{x_{4,1}, x_{4,2}, \dots\}, \quad (8)$$

где $x_{4,1}$ — давление воздуха в баллоне;

$x_{4,2}$ — температура поверхности корпуса баллона;

$x_{4,3}$ — влажностное содержание воздуха в баллоне;

$x_{4,4}$ — значение уменьшения толщины стенки корпуса баллона (вследствие коррозии).

Контроль за техническим состоянием трубопроводов производится согласно инструкции по эксплуатации ССВ и анализу известных методов диагностирования [21].

Вектор состояния трубопроводов сжатого воздуха может быть представлен в виде

$$X_5 = \{x_{5,1}, x_{5,2}, \dots\}, \quad (9)$$

где $x_{5,1}$ — давление воздуха до распределительного клапана;

$x_{5,2}$ — давление воздуха после распределительного клапана.

В соответствии с (5)–(9) вектор состояния элементов ССВ окончательно примет вид

$$X_{\text{ССВ}} = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots\}. \quad (10)$$

Опыт эксплуатации ССВ показывает, что параметры, выделенные в качестве диагностических, с течением времени меняются по различным зависимостям:

1. Такие параметры, как:

— перепад давления воздуха на фильтрах;

— давление воздуха за БОО;

— перепад давления воздуха на электромагнитных клапанах;

— давление воздуха в баллоне;

— и т.д.

изменяются линейно либо скачкообразно.

2. Такие параметры, как:

— температура в адсорберах БОО;

— влажность воздуха в баллоне;

— напряженность электрического поля поверхности корпуса баллона;

— и т.д.

изменяются линейно либо экспоненциально.

Штатными КИП можно измерять следующие параметры элементов ССВ:

— давление воздуха до и после фильтров;

— давление воздуха перед и за БОО;

— температуру в адсорберах БОО;

— влажность воздуха за БОО;

— давление воздуха до и после распределительного клапана;

— перепад давления воздуха на предохранительном клапане системы;

— давление воздуха на входе в регулятор давления;

— давление воздуха на выходе из регулятора давления;

— давление воздуха в баллоне.

Все эти параметры характеризуют работоспособность соответствующего узла ССВ. Поэтому, включая функционально связанные параметры, принимаем следующий вектор состояния второго блока

$$Y = \{y_{10}, \dots, y_{16}\}, \quad (11)$$

где y_{10} — давление воздуха за водомаслоотделителями;

y_{11} — давление воздуха за БОО;

y_{12} — влажность воздуха за БОО;

y_{13} — давление воздуха за распределительным клапаном;

y_{14} — давление воздуха за предохранительным клапаном;

y_{15} — давление воздуха, пониженное редуктором;

y_{16} — давление воздуха в баллоне.

Эти параметры подлежат периодическому контролю л/с в процессе эксплуатации ССВ.

Для ССВ, как единого объекта ВДП, получаем на основе (4) и (11)

$$Y = \{y_1, \dots, y_{16}\}. \quad (12)$$

Решить задачу прогнозирования изменения значения вектора X , а значит, и технического состояния ССВ, можно на основе контроля за ним и статистической обработки значений выборки измерений как совокупности случайных величин и использования метода экстраполяционного восстановления временного ряда, в форме которого может быть представлен данный вектор состояния [22]. При этом за основу математического описания процессов изменения величин ДП можно взять алгоритмы экспоненциального сглаживания и линейного изменения их значений.

Так, в работе [19], учитывая, что процесс получения выборки значений ДП является случайным процессом, а их значения — случайными величинами, выполнено преобразование известных базовых алгоритмов в их робастные аналоги, что позволило избежать влияния статистической неопределенности в отношении закона их распределения.

Выводы

Таким образом, ССВ, являясь СТС, состоящей из функционально связанных элементов, представлена в виде объекта диагностирования, а именно разработан вектор ее состояния, определены вид

диагностической модели и методы ее реализации. Обосновано применение к решению диагностических задач нового подхода на основе анализа диаграмм состояния ступеней компрессора, позволяющего повысить оперативность диагностирования технического состояния объекта и прогнозировать изменение этого состояния.

Предложенная модель диагностирования ПК, а также всей системы сжатого воздуха, основанная на анализе характерных неисправностей и разложения процессов, образующих диаграммы состояния его ступеней, может найти широкое применение при разработке новых видов диагностических комплексов компрессорного оборудования и систем производства, хранения, распределения газов, обеспечивающих стартовые комплексы воздухом, что, в свою очередь, повысит надежность эксплуатации на космодромах гражданского и военного назначения и их технических устройств.

Список источников

1. Наумчик И. В., Дзитолев М. С., Помошник М. В. Влияние величины вредного пространства на интегральные характеристики поршневого компрессора системы газоснабжения в составе стартового комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 553–558. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-553-554. EDN: IYXRVN.
2. Ларькин В. В., Бегунов М. Л., Николаев С. Г. [и др.] Об актуальности разработки перспективной системы контроля технического состояния сложных технических систем на основе предиктивной диагностики // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России / под ред. А. А. Поповича. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. С. 201–206. EDN: CGOYAP.
3. ГОСТ РВ 0015-301–2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Постановка на производство изделий. Основные положения. Введ. 01–07–2021. 42 с.
4. Кузнецов Л. Г., Бураков А. В., Грибанов Д. А., Хотский Р. Р. Методика расчета трудоемкости разработки судовых компрессорных станций с использованием аналога на основе ранжирования технических характеристик // Морской вестник. 2023. № 2 (86). С. 65–67. EDN: TLHLQH.
5. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 01–01–1991. Москва: Стандартинформ, 2009. 12 с.
6. Борисевич М. А. Основные направления и задачи механизации и автоматизации восстановления сложных технических систем // Проблемы науки. 2022. № 3 (71). С. 32–37. EDN: GMNERY.
7. Меньшиков Д. С. Разработка модели прогноза сигналов предвестников неисправностей газоперекачивающих агрегатов // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 5-6. С. 36–44. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-36-44. EDN: BWPSAX.
8. Атанов И. В., Капустин И. В., Грицай Д. И., Кулаев Е. В. Неисправности компрессоров холодильного оборудования // Аграрная наука и производство в условиях становления цифровой экономики Российской Федерации и мирового сообщества: материалы 17 Междунар. науч.-практ. конф. ФМСХ. Ставрополь: АГРУС, 2021. С. 14–21. EDN: YSLLHJ.
9. Сокина О. В., Хазин М. Л., Волегов С. А. Анализ причин неисправности клапанов поршневых компрессоров // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XXII Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2024. С. 385–388. EDN: ICNDXV.
10. Манойлина С. З., Артемьев В. Н., Зайцев Н. А. Основные неисправности современных поршневых компрессоров и способы их устранения // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 20 февраля 2023 года. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. С. 182–188. EDN: ELOQAO.
11. Дылдин Г. П., Макаров В. Н. Насосы и компрессоры. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 183 с. ISBN 978-5-4497-2260-7. EDN: JMLNZB.
12. Савон Я. В., Приходько М. Г., Евдокимов Е. А. Неисправности системы смазки компрессоров // Наука. Новое поколение. Успех: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 29 апреля 2022 года. Краснодар: Новация, 2022. С. 293–295. EDN: YLPIV.
13. Котлов А. А. Параметрический анализ самодействующих клапанов поршневых компрессоров методами математического моделирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 5 (710). С. 27–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-5-27-35. EDN: DYSHCP.
14. Оскома А. А. Статистический метод диагностирования компрессоров воздуха высокого давления как эффективный способ повышения безопасности их эксплуатации // Проблемы безопасности на транспорте: межвузовский сб. науч. тр. конф. Санкт-Петербург: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 1997. С. 5–13.
15. Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Демин А. М., Одинец А. И. Вероятностно-статистический критерий оценки состояния по параметрам виброакустического сигнала // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLIAI.
16. 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.
17. Оскома А. А., Суриков Д. Г. Формирование модели диагностирования СКAB-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.
18. Равин А. А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2016. 436 с. EDN: CFMONC.
19. Бураков А. В., Хотский Р. Р., Зуев П. Ю., Абрамов А. И. Разработка систем управления, обеспечивающих диагностику с применением робастного метода для перспективных судовых поршневых компрессоров // Морской вестник. 2024. № 3 (91). С. 33–37. EDN: KCVSKY.
20. Венцолис Л. С., Коновалов П. Н., Рыбалко В. В. Диагностирование корабельных КТЭУ и ГТЭУ. Санкт-Петербург: ВМА им. Кузнецова, 1995. 336 с.
21. Рамазанов Р. М., Рамазанов М. И., Губайдуллин К. Ж. Диагностирование состояния трубопроводных обвязок компрессорных станций // Достижения науки и образования. 2020. № 2 (56). С. 5–10. EDN: BVPYXA.
22. Краснов А. Ю. Статистические методы в инженерных исследованиях. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2022. 119 с.

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
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

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

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024 г.

© А. В. Бураков, Р. Р. Хотский, Л. Г. Кузнецов

SELECTION AND STUDY OF METHODS FOR IMPLEMENTING A DIAGNOSTIC MODEL FOR COMPRESSOR STATIONS OF THE ROCKET AND SPACE COMPLEX

A. V. Burakov¹, R. R. Khot'skiy², L. G. Kuznetsov¹

¹JSC «Compressor»,
Russia, Saint Petersburg, Bolshoi Sampsonievsky Ave., 64, 194044
²808 Military Representative Office of the Russian Defense Ministry,
Russia, Saint Petersburg, Babushkina Str., 123, 192012

The article considers a compressed air system as an object of diagnosis, which is part of a complex of compressor equipment for the production, storage, and distribution of gases for spaceports providing launch vehicles. A model for diagnosing a reciprocating compressor as the main device for the production of compressed air is selected, based on the analysis of characteristic malfunctions. Vectors of the state of the elements of the compressed air system have been developed based on a variety of structural parameters characterizing the technical condition of the diagnostic object. It is proposed to use wavelet analysis to process the diagnostic parameters obtained by analyzing the indicator diagrams of the stages of a reciprocating compressor.

Keywords: piston compressor, indicator diagram, diagnostic model, diagnostic parameters, technical diagnostics.

References

1. Naumchik I. V., Dzitoyev M. S., Pomoshnik M. V. Vliyaniye velichiny vrednogo prostranstva na integral'nyye kharakteristiki porshneвого komпрессора системы газоснабжения в составе startovого kompleksa [The influence of the amount of harmful space on the integral characteristics of the piston compressor of the gas supply system as part of the launch complex]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 5. P. 553–558. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-553-554. EDN: IYXR VH. (In Russ.).
2. Larkin V. V., Begunov M. L., Nikolayev S. G. [et al.] Ob aktual'nosti razrabotki perspektivnoy sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove prediktivnoy diagnostiki [On the relevance of developing a promising system for monitoring the technical condition of complex technical systems based on predictive diagnostics]. *Modeli i metody razvitiya tekhnologiy mashinostroyeniya v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki Rossii. Models and Methods of Mechanical Engineering Technology Development in the Conditions of the Russian Economy Digitalisation* / Ed. by A. A. Popovich. Saint Petersburg, 2022. P. 201–206. EDN: CGOYAP. (In Russ.).
3. GOST RV 0015-301–2020 Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo voyennoy tekhniki. Postanovka na proizvodstvo izdeliy. Osnovnyye polozheniya [System of development and commissioning of military equipment. Setting up the production of products. The main provisions]. 42 p. (In Russ.).
4. Kuznetsov L. G., Burakov A. V., Gribanov D. A., Khot'skiy R. R. Metodika rascheta trudoyemkosti razrabotki sudovykh kompressornykh stantsiy s ispol'zovaniyem analoga na osnove ranzhirovaniya tekhnicheskikh kharakteristik [Method for calculating the labor intensity of the development of ship compressor stations using an analogue based on the ranking of technical characteristics]. *Morskoy Vestnik*. 2023. No. 2 (86). P. 65–67. EDN: TLHLQH. (In Russ.).
5. GOST 20911–89. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya [Technical diagnostics. Terms and definitions]. Moscow, 2009. 12 p. (In Russ.).
6. Borisevich M. A. Osnovnyye napravleniya i zadachi mekhanizatsii i avtomatizatsii vosstanovleniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Main directions and tasks of mechanisation and automation of complex technical systems reconstruction]. *Problemy nauki. Problems of Science*. 2022. No. 3 (71). P. 32–37. EDN: GMNERY. (In Russ.).
7. Men'shikov D. S. Razrabotka modeli prognoza signalov predvestnikov neispravnostey gazoperekachivayushchikh agregatov [Development of a model for prediction of signals of harbingers of malfunctions in gas-compressor units]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal. International Technical and Economic Journal*. 2022. No. 5-6. P. 36–44. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-36-44. EDN: BWPSAX. (In Russ.).
8. Atanov I. V., Kapustin I. V., Gritsay D. I., Kulayev E. V. Neispravnosti kompressorov kholodil'nogo oborudovaniya [Malfunctions of compressors of refrigeration equipment]. *Agrarnaya Nauka i Proizvodstvo v Usloviyakh Stanovleniya Tsifrovoy Ekonomiki Rossiyskoy Federatsii i Mirovogo Soobshchestva*. Stavropol, 2021. P. 14–21. EDN: YSLHJ. (In Russ.).
9. Sokerina O. V., Khazin M. L., Volegov S. A. Analiz prichin neispravnosti klapanov porshnevnykh kompressorov [Analysis of the causes of malfunction of piston compressor valves]. *Tekhnologicheskoye Oborudovaniye Dlya Gornoy i Neftegazovoy Promyshlennosti*. Yekaterinburg, 2024. P. 385–388. EDN: ICNDXV. (In Russ.).
10. Manoylina S. Z., Artem'yev V. N., Zaytsev N. A. Osnovnyye neispravnosti sovremennykh porshnevnykh kompressorov i sposoby ikh ustraneniya [The main malfunctions of modern reciprocating compressors and ways to eliminate them]. *Tendentsii Razvitiya Tekhnicheskikh Sredstv i Tekhnologiy v APK*. Voronezh, 2023. P. 182–188. EDN: ELOQAO. (In Russ.).
11. Dyldin G. P., Makarov V. N. Nasosy i kompressory [Pumps and compressors]. Moscow, 2023. 183 p. ISBN 978-5-4497-2260-7. EDN: JMLNZB. (In Russ.).

12. Savvon Ya. V., Prikhod'ko M. G., Evdokimov E. A. Neispravnosti sistemy smazki kompressorov [Compressor lubrication system malfunctions]. *Nauka. Novoye Pokoleniye. Uspekhi*. Krasnodar, 2022. P. 293–295. EDN: YJIIIV. (In Russ.).

13. Kotlov A. A. Parametricheskii analiz samodeystvuyushchikh klapanov porshnevnykh kompressorov metodami matematicheskogo modelirovaniya [A parametric analysis of self-acting valves of reciprocating compressors using mathematical modeling methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2019. No. 5 (710). P. 27–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-5-27-35. EDN: DYSHCP. (In Russ.).

14. Oskoma A. A. Statisticheskii metod diagnostirovaniya kompressorov vozdukh vysokogo davleniya, kak effektivnyy sposob povysheniya bezopasnosti ikh ekspluatatsii [Statistical method of the high-pressure air compressor diagnostics as an effective way to improve safety of their operation]. *Problemy Bezopasnosti na Transporte. Problems of Transport Safety*. Saint Petersburg, 1997. P. 5–13. (In Russ.).

15. Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P., Demin A. M., Odinets A. I. Veroyatnostno-statisticheskii kriteriy otsenki sostoyaniya po parametram vibroakusticheskogo signala [Probabilistic and statistical criteria for assessing the condition by vibroacoustic signal parameters]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLIAl. (In Russ.).

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

17. 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.).

18. Ravin A. A. Diagnosticheskoye obespecheniye sudovogo energeticheskogo oborudovaniya: problemy i resheniya [Diagnostic support of marine power equipment: problems and solutions]. Saint Petersburg, 2016. 436 p. EDN: CFMONC. (In Russ.).

19. Burakov A. V., Khotskiy R. R., Zuyev P. Yu., Abramov A. I. Razrabotka sistem upravleniya, obespechivayushchikh diagnostiku s primeneniym robustnogo metoda dlya perspektivnykh sudovykh porshnevnykh kompressorov [Development of control

systems providing diagnostics using a robust method for advanced marine reciprocating compressors]. *Morskoy Vestnik*. 2024. No. 3 (91). P. 33–37. EDN: KCVSKY. (In Russ.).

20. Ventsyulis L. S., Kononov P. N., Rybalko V. V. Diagnostirovaniye korabel'nykh KTEU i GTEU [Diagnostics of the shipboard Boiler Turbine Power Plants and Gas Turbine Power Plants]. Saint Petersburg, 1995. 336 p. (In Russ.).

21. Ramazanov R. M., Ramazanov M. I., Gubaydullin K. Zh. Diagnostirovaniye sostoyaniya truboprovodnykh obvyazok kompressornykh stantsiy [Diagnostics of compressor station piping systems condition]. *Dostizheniya Nauki i Obrazovaniya*. 2020. No. 2 (56). P. 5–10. EDN: BVPYXA. (In Russ.).

22. Krasnov A. Yu. Statisticheskiye metody v inzhenernykh issledovaniyakh [Statistical methods in engineering research]. Saint Petersburg, 2022. 119 p. (In Russ.).

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

KHOTSKEY 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

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

For citations

Burakov A. V., Khotskiy R. R., Kuznetsov L. G. Selection and study of methods for implementing a diagnostic model for compressor stations of the rocket and space complex. *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: JRHMT0.

Received October 28, 2024.

© A. V. Burakov, R. R. Khotskiy, L. G. Kuznetsov