

УДК 62–192:621.512.3

Формирование модели диагностирования СКАВ-7,5 на основе вектора его диагностических параметров

Канд. техн. наук А. А. ОСКОМА¹, канд. техн. наук Д. Г. СУРИКОВ²

¹oscoma1@yandex.ru, ²surikov77@mail.ru

Университет ИТМО

Проведено исследование по созданию модели диагностирования автоматизированной компрессорной станции СКАВ-7,5. В ходе исследования было принято решение по использованию в качестве диагностических параметров коэффициентов ряда Фурье, полученных при разложении действительных индикаторных диаграмм ступеней поршневого пятиступенчатого воздушного компрессора СКАВ-7,5 в ряд Фурье. Моделирование неисправностей на испытательном стенде проводилось на основе статистического анализа неисправностей поршневых компрессоров, зафиксированных на судах промышленного флота и кораблях ВМФ. На основании проведенного исследования получены индикаторные диаграммы для любой ступени воздушного поршневого компрессора при основных неисправностях.

Ключевые слова: индикаторная диаграмма, ряды Фурье, модель диагностирования, поршневой компрессор, неисправности компрессора, надежность вспомогательных механизмов, диагностические параметры.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.10.2021, принята к печати 15.11.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-30-37

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Оскома А. А., Суриков Д. Г. Формирование модели диагностирования СКАВ-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

Model for diagnosing SKAB-7.5 on the basis of the vector for its diagnosing parameters

Ph. D. A. A. OSKOMA¹, Ph. D. D. G. SURIKOV²

¹oscoma1@yandex.ru, ²surikov77@mail.ru

ITMO University

The article describes a statistical research on the designing a model for diagnosing SKAB-7.5 automatic compressor plant. The coefficients of Fourier series have been decided to be used as diagnosing parameters. Those coefficients have been obtained by decomposition of actual indicator diagrams for the stages of SKAB-7.5 five-stage reciprocating air compressor in Fourier series. Modeling the faults at the experimental stand has been made on the basis of statistical analysis of the reciprocating compressors' faults which were detected aboard fishing fleet and Navy ships. On the basis of the research indicator diagrams for any stage of reciprocating air compressor at general faults have been obtained.

Keywords: indicator diagram, Fourier series, diagnosing model, reciprocating compressor, compressor faults, auxiliary machinery reliability, diagnosing parameters.

Article info:

Received 04/10/2021, accepted 15/11/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-30-37

Article in Russian

For citation:

Oskoma A. A., Surikov D. G. Model for diagnosing SKAB-7.5 on the basis of the vector for its diagnosing parameters *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 4. p. 30–37. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-30-37

Введение

В настоящее время предъявляются повышенные требования к надежности вспомогательных механизмов и систем судов и кораблей. Эти требования должны соответствовать ГОСТ Р 56243–2014 [1] в гражданском

флоте и соответствующим руководящим документам в ВМФ. Возникает необходимость в разработке модели по формированию диагностирования неисправностей надежности основных вспомогательных механизмов и систем судов и кораблей. В настоящей работе предла-

гается для оценки неисправностей численная модель, основанная на разложении рядов Фурье, на примере компрессорной станции СКАВ-7,5, в состав которой входит воздушный поршневой компрессор.

Данная компрессорная станция устанавливается на судах и кораблях, где предъявляются высокие требования к безотказной работе системы сжатого воздуха [2]. В связи с тем, что при выходе из строя одного компрессора это приведет к серьезным последствиям для всего корабля или судна, так как не всегда имеется второй (резервный) эквивалентный компрессор.

Применение технического диагностирования позволяет спрогнозировать неисправности в компрессоре и, соответственно, предотвратить аварийную ситуацию. Техническое диагностирование также позволяет производить техническое обслуживание поршневого компрессора (ПК) не по наработке, а по фактическому техническому состоянию, что в свою очередь снижает эксплуатационные расходы на 20–40% [3].

Модель диагностирования неисправностей применима для любых марок поршневых компрессоров систем сжатого воздуха.

При диагностировании поршневых компрессоров систем сжатого воздуха (ССВ) ранее применялись параметрические и виброакустические методы диагностирования [4]–[7].

Целью настоящего исследования является выбор наиболее оптимальной модели диагностирования поршневого компрессора, основанной на примере компрессорной станции СКАВ-7,5. В основе метода лежит разложение индикаторной диаграммы любой ступени поршневого компрессора в ряд Фурье, где в качестве диагностических параметров применяются коэффициенты ряда Фурье.

Предлагаемый метод не использовался ранее в системах диагностирования поршневых компрессоров систем сжатого воздуха (ССВ).

Объект и метод исследования

Объектом исследования является 5-ступенчатый поршневой воздушный компрессор станции компрессорной автоматизированной СКАВ-7,5 (см. рис. 1) с электрическим приводом, имеющий ступени двойного действия. Конечное давление после сжатия воздуха соответствует значению 400 кгс/см².

Модель диагностирования любой ступени поршневого компрессора СКАВ-7,5 можно представить следующим образом (рис. 2):

Техническое состояние объекта диагностирования характеризуется множеством структурных параметров $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ [9, 10]. Для компрессора СКАВ-7,5 приняты следующие структурные параметры:

- x_1 — зазоры между втулкой цилиндра и поршнем;
- x_2 — износ поршневых колец;
- x_3 — зазоры между валом и коренным подшипником;
- x_4 — зазоры в шаровой опоре цилиндра;
- x_5 — зазоры между тарелкой и седлом клапана;
- x_6 — ослабление пружин клапана;
- x_7 — износ тарелки клапана;
- x_8 — зазоры в прецессионных парах лубрикаторного насоса;

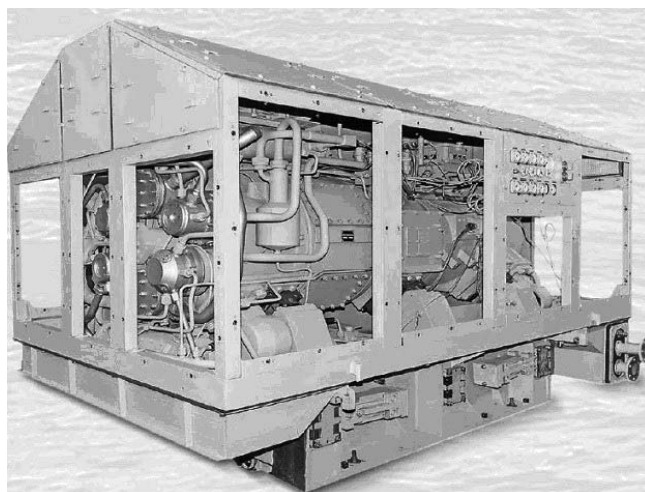


Рис. 1. Станция компрессорная автоматизированная СКАВ-7,5 [8]

Fig. 1. SKAB-7.5 automatic compressor plant [8]

x_9 — износ сальника подшипника.

Измеряемые параметры представленные в виде Y_r (y_1, y_2, \dots, y_r), базируются на возможностях штатного контрольно-измерительного комплекса. Необходимо сформировать на базе Y_r перечень диагностических параметров, которые должны быть независимыми друг от друга, доступны прямому измерению и связаны функционально с множеством структурных параметров.

Таким образом, для исследуемого компрессора СКАВ-7,5 множество Y_r представлено, как:

- y_1 — температура воздуха на всасывании в 1 ступень цилиндра 1;
- y_2 — температура воздуха на всасывании в 1 ступень цилиндра 2;
- y_3 — температура воздуха на всасывании во 2 ступень;
- y_4 — температура воздуха на всасывании в 3 ступень;
- y_5 — температура воздуха на всасывании в 4 ступень;
- y_6 — температура воздуха на всасывании в 5 ступень;
- y_7 — температура воздуха за 5 ступенью;
- y_8 — температура воздуха за 1 ступенью;

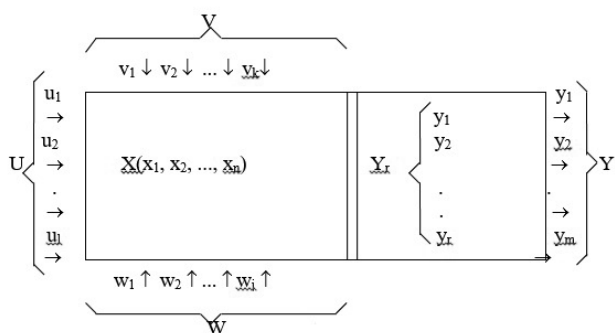


Рис. 2. Модель диагностирования любой ступени поршневого компрессора СКАВ-7,5

Fig. 2. Diagnosing model for any stage of SKAB-7.5 reciprocating compressor

- y_9 — давление воздуха за 1 ступенью;
- y_{10} — давление воздуха за 2 ступенью;
- y_{11} — давление воздуха за 3 ступенью;
- y_{12} — давление воздуха за 4 ступенью;
- y_{13} — давление воздуха за 5 ступенью.

Пересчет производительности компрессора осуществляется на основании общеизвестных уравнений состояния газа [11]–[13]:

$$V_k / V_{ct} = P_{ct} / P_k (T_k / T_{ct})^{60}. \quad (1)$$

При аналитическом определении термодинамических параметров принимается за основу степень сжатия $\pi_{кст.} = P_{к. ст.} / P_{н. ст.}$. Тогда в качестве диагностического параметра цилиндрично-поршневой группы (ЦПГ) i -й ступени принята степень повышения давления за ней или $y_1 = \pi_{ст. 1}$; ...; $y_5 = \pi_{ст. 5}$.

Работоспособность кривошипно-шатунного механизма (КШМ) оценивается суммарным зазором пары шаровых опор рядов 1 ступени, как y_6 .

Характеристикой работы всасывающих и нагнетательных клапанов в каждой ступени являются значения давлений всасывания и нагнетания, которые в свою очередь при известном атмосферном давлении рассчитываются через $\pi_{ст. i}$ или через y_1, \dots, y_5 .

На выходе из ступени воздух направляется в холодильный с целью понижения температуры для входа в следующую ступень. Работоспособность холодильника оценивается температурой и давлением воды на входе и выходе из системы охлаждения. Перепад давления характеризует гидродинамические свойства проточной части системы охлаждения, а перепад температуры — процесс теплопередачи через фиксированную поверхность теплообмена в каждой ступени. В качестве диагностического параметра таким образом приняты перепады давления и температуры воды в системе охлаждения или y_7 и y_8 .

В системе смазки производятся замеры давления и температуры масла на входе и выходе из компрессора. В качестве диагностических параметров приняты: перепад давления масла в компрессоре — y_9 , и температура масла после масляного насоса — y_{10} .

На основании статистического анализа обобщенных сведений по отказам корабельных электрокомпрессоров выявлено, что наиболее уязвимыми являются следующие узлы:

- втулка цилиндра и поршень;
- самодействующие клапаны;
- холодильники;
- кольца поршневые;
- подшипники КШМ;
- насос заборной воды.

Таким образом, сформулируем окончательный перечень диагностических параметров СКАВ-7,5 характеризуется вектором $Y = \{y_m\}$ при $m = 1, 2, \dots, 10$:

$$Y = y_1, y_2, \dots, y_{10}, \quad (2)$$

- где y_1 — степень повышения давления воздуха в 1 ступени;
- y_2 — степень повышения давления воздуха во 2 ступени;
- y_3 — степень повышения давления воздуха в 3 ступени;
- y_4 — степень повышения давления воздуха в 4 ступени;
- y_5 — степень повышения давления воздуха в 5 ступени;

- y_6 — суммарный зазор пары шаровых опор рядов 1 ступени;
- y_7 — перепад давления в системе охлаждения; y_8 — перепад температуры в системе охлаждения; y_9 — перепад давления в масляной системе компрессора; y_{10} — температура масла за насосом.

Формирование вектора диагностических параметров (ВДП) Y и определение их связей со структурными параметрами X осуществляется на фоне воздействия внешних условий, которые можно подразделить на три группы:

- управляющие воздействия — множество $U (u_1, u_2, \dots, u_i)$;
- контролируемые внешние факторы — множество $V (v_1, v_2, \dots, v_k)$;
- неконтролируемые факторы — множество $W (w_1, w_2, \dots, w_j)$.

Выделить вышеперечисленные факторы и учесть их влияние на форму зависимости между структурными и диагностическими параметрами не всегда представляется возможным. Поэтому попытки аналитического построения диагностической модели, позволяющие определить такую связь, либо невозможны, либо дают весьма приближенный результат, что подтверждается авторами в работах [14]–[19].

Для решения выше поставленной задачи в исследовании применен новый подход в теории диагностирования поршневых компрессоров, который основан на анализе параметров индикаторной диаграммы ступени поршневого компрессора [11]–[13] с последующим разложением ее в ряд Фурье. В итоге в качестве диагностических параметров используются коэффициенты ряда Фурье [2, 9].

Индикаторная диаграмма каждого цилиндра компрессора своими параметрами однозначно определяет искомую функциональную зависимость между структурными параметрами, характеризующими техническое состояние компрессора и его ступеней, и диагностическими измеряемыми параметрами, характеризующими термодинамические и физические процессы, происходящие в этих ступенях. Причем вид диаграммы формируется уже с учетом всего перечня внешних воздействий, что не требует их специального аналитического описания.

В данном исследовании рассмотрены следующие неисправности ПК:

- слишком большое вредное пространство (см. рис. 4);
- заедание в открытом положении нагнетательного клапана (см. рис. 5);
- заедание всасывающего клапана (см. рис. 6);
- неплотность клапанов (см. рис. 7);
- отскакивание нагнетательного клапана от своего седла и пропуск воздуха (см. рис. 8);
- слишком малые поперечные сечения всасывающих клапанов или всасывающего трубопровода (см. рис. 9);
- большое сопротивление в нагнетательном клапане или трубопроводе (см. рис. 10);
- пропуск воздуха поршневыми кольцами (см. рис. 11).

При проведении экспериментальных исследований компрессорной станции СКАВ-7,5 на испытательном стенде завода ОАО «Компрессор» были поочередно смо-

делированы выше обозначенные неисправности. Это позволило разработать соответствующие диагностические модели.

Индикаторная диаграмма, построенная в заданном масштабе, может служить диагностической моделью, определяющей взаимосвязь между структурными параметрами, характеризующими текущее техническое состояние ступеней компрессора и диагностическими параметрами, характеризующими термодинамические и физические процессы, происходящие в этих ступенях.

Кроме того, учитывая изменения диагностических и структурных параметров во времени возможно представить зависимости, определяющие процессы диаграммы, в виде покоординатных зависимостей от времени, имеющих периодический характер. Этот подход позволяет решить две задачи, а именно:

1. Значительно повысить оперативность диагностирования элементов поршневого компрессора путем введения в состав ДП коэффициентов временного ряда. В этом случае появляется реальная возможность количественной оценки изменения не только самих физических параметров на уровне их математических ожиданий, но и корреляционных связей между ними.

В работах [20]–[24] указывается, что для ряда технических объектов, к которым относится и поршневой компрессор, изменение корреляционных связей между параметрами, характеризующими его работу, предшествует изменению самих этих параметров;

2. Представление процессов индикаторной диаграммы в виде покоординатных зависимостей от времени позволяет (на основе выборки контролируемых параметров определенной длины) решать задачу прогнозирования изменения этого временного ряда, а значит задачу определения технического состояния компрессора.

На рис. 3 представлена действительная индикаторная диаграмма ступени компрессора при штатной его работе. На рис. 4–11 рассмотрены диагностические модели индикаторных диаграмм с соответствующими видами неисправностей.

На рис. 3 представлена действительная диаграмма работы ступени «исправного» компрессора, где $d-c$ — процесс всасывания, который идет несколько ниже атмосферного давления ($e-e$); $b-a$ — процесс нагнетания, проходящий несколько выше давления в нагнетательном трубопроводе ($k-k$); $a-d$ — процесс расширения воздуха, оставшегося во вредном пространстве.

Небольшой «крючок» на диаграмме в области d показывает работу, затрачиваемую на открытие всасывающего клапана, а «крючок» области b — работу, затрачиваемую на открытие нагнетательного клапана.

На рис. 4 представлена индикаторная диаграмма 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.

Для восстановления штатной работы компрессора необходимо уменьшить объем вредного пространства за счет регулировки длины шатуна.

На рис. 5 точка b начала нагнетания лежит выше нормального положения. Это происходит вследствие за-

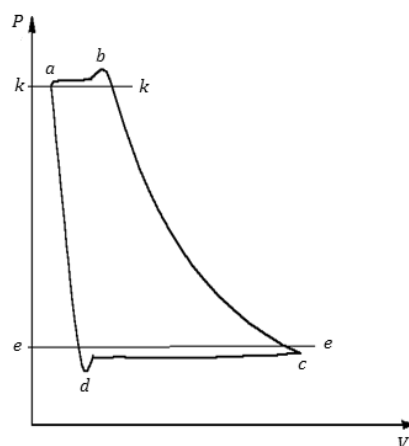


Рис. 3. Действительная диаграмма работы ступени поршневого компрессора

Fig. 3. Actual diagram for the operation of reciprocating compressor stage

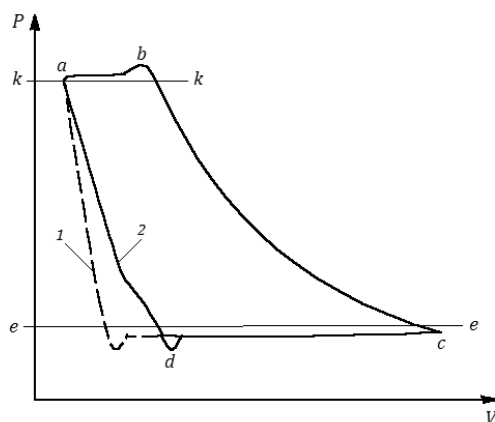


Рис. 4. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего слишком большое вредное пространство:

1 — цилиндр в исправном состоянии;
2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 4. Indicator diagram for a compressor cylinder with an excessive clearance space:
1 — the cylinder is in good condition;
2 — the presence of a malfunction in the cylinder

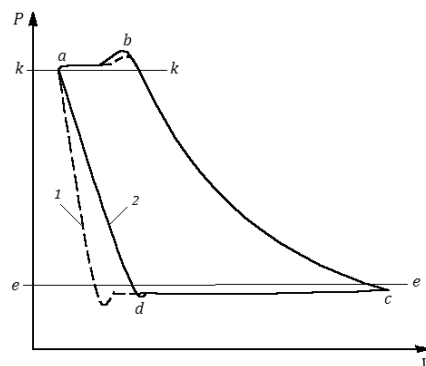


Рис. 5. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего заедание в открытом положении нагнетательного клапана: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 5. Indicator diagram for a compressor cylinder with discharge valve sticking open: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

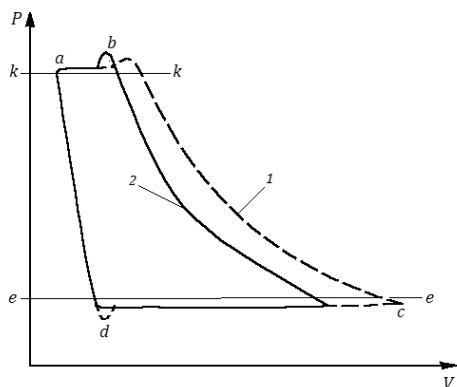


Рис. 6. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего заедание всасывающего клапана: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 6. Indicator diagram for a compressor cylinder with suction valve sticking: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

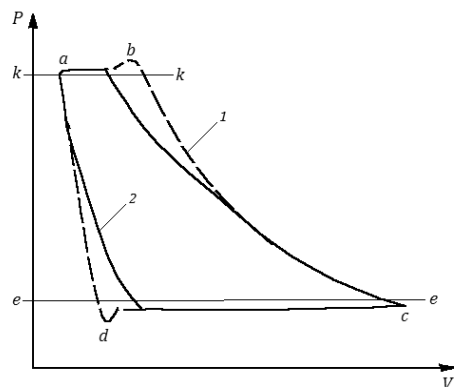


Рис. 7. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора имеющего неплотность клапанов: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 7. Indicator diagram for a compressor cylinder with valve leakages: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

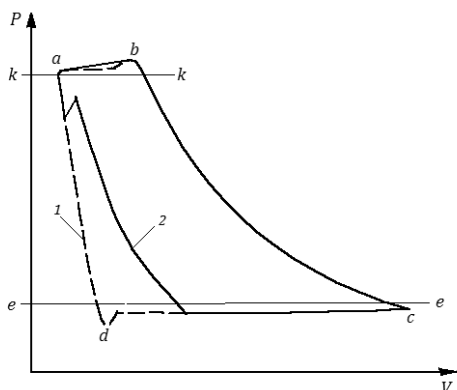


Рис. 8. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего отскакивание нагнетательного клапана от своего седла и пропуск воздуха:

1 — цилиндр в исправном состоянии;
2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 8. Indicator diagram for a compressor cylinder with discharge valve bounce and air leakage: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

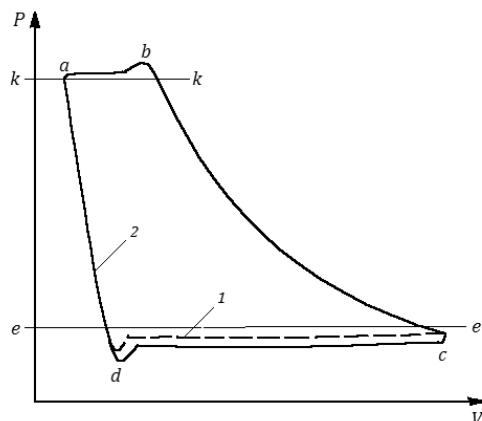


Рис. 9. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего слишком малые поперечные сечения всасывающих клапанов или всасывающего трубопровода: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 9. Indicator diagram for a compressor cylinder with excessively small cross-sections of suction valves or line: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

едания нагнетательного клапана, что вызывает позднее его открытие.

В конце процесса нагнетания по той же причине клапан не сразу закрывается и при обратном ходе поршня через него поступает в цилиндр некоторое количество сжатого воздуха из нагнетательного воздухопровода.

Таким образом, линия расширения $a-d$ отклоняется (как и в предыдущем случае) вправо от нормального положения.

Для устранения этого дефекта необходимо вскрыть клапанную коробку и отладить нагнетательный клапан.

На рис. 6 показана индикаторная диаграмма компрессора, у которого всасывающий клапан открывается с большим усилием и запозданием, на что указывает слишком большой «крючок» d в период всасывания и большое запаздывание сжатия $d-c$.

Устранение данного дефекта производится путем разборки, очистки и подгонки всасывающих клапанов.

На индикаторной диаграмме, представленной на рис. 7, имеются искривления, как в начале процесса всасывания, так и в конце процесса сжатия. Это указывает на неплотности во всасывающих и нагнетательных клапанах, устранение которых производится путем притирки клапанов и проверки правильности их посадки.

На рис. 8 представлена индикаторная диаграмма, показывающая неисправность — отскакивание нагнетательного клапана от седла. На данную неисправность указывает «крючок» a на кривой расширения $a-d$, далее кривая идет плавно, но часть воздуха из нагнетательного трубопровода возвращается через открывающийся клапан обратно в цилиндр компрессора, что приводит к уменьшению засасываемого количества воздуха, к снижению производительности компрессора, резкому повышению температуры сжатого воздуха и, таким образом, увеличивается расход энергии на сжатие. Устранение

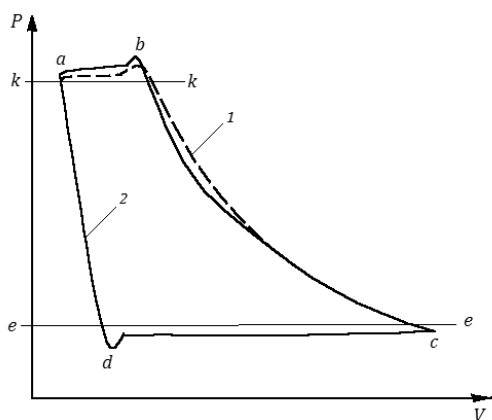


Рис. 10. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего большое сопротивление в нагнетательном клапане или трубопроводе: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 10. Indicator diagram for a compressor cylinder with high discharge valve or line resistance: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

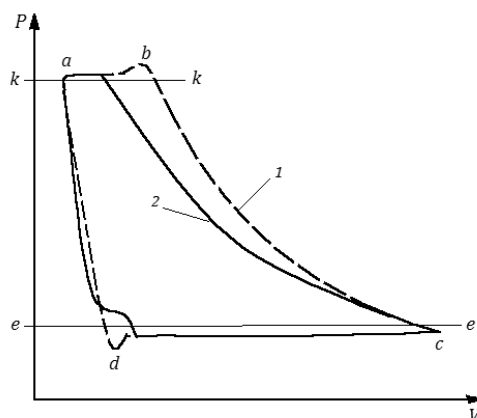


Рис. 11. Индикаторная диаграмма цилиндра компрессора, имеющего пропуск воздуха поршневыми кольцами: 1 — цилиндр в исправном состоянии; 2 — наличие неисправности в цилиндре

Fig. 11. Indicator diagram for a compressor cylinder with air leakage in compression rings: 1 — the cylinder is in good condition; 2 — the presence of a malfunction in the cylinder

данной неисправности производится путем разборки, ремонта клапана или его замены.

На рис. 9 приведена индикаторная диаграмма, на которой видно, что значение давления всасывания значительно ниже атмосферного. Это возможно, если имеются большие сопротивления при проходе воздуха через всасывающие клапаны или всасывающий трубопровод из-за малого сечения. Дефект устраняется путем увеличения сечения всасывающих клапанов или трубопроводов. Большое сопротивление всасывающего трубопровода чаще всего вызывается загрязнением воздушного фильтра и устраняется путем его очистки.

Диаграмма, представленная на рис. 10, характерна тем, что линия нагнетания $b-a$ расположена выше штатной, что указывает на большое сопротивление в нагнетательных клапанах или нагнетательных трубопроводах. Увеличение сопротивления в нагнетательном трубопроводе может быть вызвано постановкой прокладок малого диаметра, вставленных между фланцами или загрязнением трубопровода, что устраняется заменой или чисткой вышеуказанного.

На рис. 11 изображена индикаторная диаграмма, имеющая неисправность в виде пропуска воздуха поршневыми кольцами. В данном случае линия сжатия $c-b$ расположена левее штатной кривой сжатия, показанной пунктиром, что указывает на протекание некоторой части сжимаемого воздуха в другую полость цилиндра, где происходит процесс всасывания. Линия расширения $a-d$ не опускается сразу до давления всасывания (за счет перехода воздуха из другой полости цилиндра, где в это

время происходит сжатие). Устранение дефекта производится путем замены поршневых колец.

Заключение

В результате проведенного исследования сформирована модель диагностирования компрессорной станции СКАВ-7,5, где в качестве вектора его диагностических параметров выступают коэффициенты ряда Фурье, полученные при разложении индикаторной диаграммы любой ступени ПК в ряд Фурье. Изменение коэффициентов ряда Фурье от эталонного состояния (компрессор в исправном состоянии) позволяет диагностировать ту или иную неисправность, что в свою очередь позволяет производить техническое обслуживание по фактическому техническому состоянию.

В перспективе необходимо ввести во вновь создаваемый диагностический комплекс эталонные диаграммы ступеней исправного компрессора, разложенные в ряд Фурье, а также диаграммы ступеней компрессора разложенные в ряд Фурье при характерных неисправностях для обучения диагностического комплекса.

Диагностический комплекс позволит в реальном времени прогнозировать наступление отказа и давать рекомендации обслуживающему персоналу по срокам обслуживания до наступления критического состояния элементов компрессора, что снизит время простоя оборудования корабля или судна, и как следствие — снизит затраты связанные с ремонтом ПК.

Полученная модель диагностирования может применяться для любых типов поршневых компрессоров.

Литература

- ГОСТ Р 56243–2014. Внутренний водный транспорт. Система управления безопасностью судов. Требования по обеспечению надежности механизмов. 2014.
- Оскома А. А. Диагностирование поршневых компрессоров судовых систем сжатого воздуха на основе временного ана-

References

- State standard R 56243–2014. Inland waterway transport. Ship safety management system. Requirements for ensuring the reliability of mechanisms. 2014. (in Russian)
- Oskoma A. A. Diagnostics of reciprocating compressors of marine compressed air systems based on a time analysis of their

- лиза их индикаторных диаграмм. В кн. Информационные технологии в транспортной и стационарной энергетике. СПб.: Санкт-Петербургская инженерная академия, 1998. 5 с.
3. Мясников Ю. Н. Междисциплинарные инновационные технологии в судостроении. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 1 (387). С. 184–196.
 4. Schultheis S. M., Lickteig C. A., Parchewsky R. Reciprocating compressor condition monitoring // 36th Turbomachinery Symposium. College Station. 2007. P. 10–13.
 5. Mitchell J. S. From vibration measurements to condition based maintenance seventy years of continuous progress // Journal of Sound and Vibration. 2007. No. 41 (1). P. 62–75.
 6. Байков И. Р., Китаев С. В., Смородов Е. А., Гольянов А. И. Уточнение методики определения технического состояния газоперекачивающих агрегатов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 3–4. С. 3–6.
 7. Костяков В. Н., Науменко А. П. Анализ современных методов и средств мониторинга и диагностики поршневых компрессоров. Ч. 1. Системы real-time мониторинга // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 1 (47). С. 64–70.
 8. Станция компрессорная автоматизированная СКАВ-7,5. [Электронный ресурс]: <http://www.compressor.spb.ru/>
 9. Оскома А. А. Статистический метод диагностирования компрессоров воздуха высокого давления, как эффективный способ повышения безопасности их эксплуатации. // Межвузовский сборник научных трудов конференции «Проблемы безопасности на транспорте». СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 1997.
 10. Фолиянц А. Е., Мартынов Н. В., Булыгин А. С., Сученинов А. П., Пилин Б. П., Билько Г. И., Горьковая Л. П. Общие технические условия по ремонту поршневых компрессоров. 1985. 362 с.
 11. Френкель М. И. Поршневые компрессоры: Теория, конструкции и основы проектирования. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машгиз, 1960. 655 с.
 12. Frenkel M. I. Kolbenverdichter. Theorie, Konstruktion und Projektierung. German. Berlin: Technik, 1969. 747 p.
 13. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет. М.: КолосС, 2006. 456 с.
 14. Ходырев А. И., Шахов А. В. Математическое моделирование неисправностей ступени поршневого компрессора в целях технического диагностирования. // Территория Нефтегаз. 2020. № 1–2. с. 46–54.
 15. Сарманаева А. Ф. Математическое моделирование рабочих процессов поршневых компрессоров с учетом действительной формы рабочих элементов кольцевых клапанов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2015. 164 с.
 16. Ходырев А. И., Мартынов В. Н. Математическое моделирование работы насосно-компрессорной установки для нагнетания газожидкостных смесей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 4. С. 19–22.
 17. Равин А. А. Техническая диагностика судового энергетического оборудования. СПб.: Издательство Лань, 2021. 240 с.
 18. Науменко А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль: учеб. Пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. 152 с.
 19. Мясников Ю. Н. Надежность и техническая диагностика судовых энергомеханических систем (НТДИКА). СПб.: Изд. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2008. 183 с.
 20. Мас А. О., Жильцов А. С., Охлонин В. А. Диагностирование судовых технических средств методом тепловизионной indicator diagrams. In the book: Information technologies in transport and stationary power engineering. St. Petersburg: St. Petersburg Engineering Academy, 1998. 5 p. (in Russian)
 3. Myasnikov Yu. N. Interdisciplinary innovative technologies in shipbuilding. *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2019. No. 1 (387). pp. 184–196. (in Russian)
 4. Schultheis S. M., Lickteig C. A., Parchewsky R. Reciprocating compressor condition monitoring. *36th Turbomachinery Symposium*. College Station. 2007. P. 10–13.
 5. Mitchell J. S. From vibration measurements to condition based maintenance seventy years of continuous progress. *Journal of Sound and Vibration*. 2007. No. 41 (1). P. 62–75.
 6. Baykov I. R., Kitaev C. B., Smorodov E. A., Golyanov A. I. Refinement of the methodology for determining the technical condition of gas pumping units. *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2001. No. 3–4. pp. 3–6. (in Russian)
 7. Kostyakov V. N., Naumenko A. P. Analysis of modern methods and means of monitoring and diagnostics of reciprocating compressors. Part 1. Real-time monitoring systems. *In the world of non-destructive testing*. 2010. No. 1 (47). pp. 64–70. (in Russian)
 8. Automated compressor station SKAV-7.5. [Electronic resource]: <http://www.compressor.spb.ru/> (in Russian)
 9. Oskoma A. A. Statistical method of diagnosing high-pressure air compressors as an effective way to improve the safety of their operation. *Interuniversity collection of scientific papers of the conference «Problems of transport safety»*. St. Petersburg: GMA named after Adm. S. O. Makarov, 1997. (in Russian)
 10. Foliyants A. E., Martynov N. V., Bulygin A. S., Sucheninov A. P., Pilin B. P., Bilko G. I., Gorkova L. P. General technical conditions for the repair of reciprocating compressors. 1985. 362 p. (in Russian)
 11. Frenkel M. I. Reciprocating compressors: Theory, designs and fundamentals of design. 2nd ed., reprint. and additional I.: Mashgiz, 1960. 655 p. (in Russian)
 12. Frenkel M. I. Kolbenverdichter. Theorie, Konstruktion und Projektierung. German. Berlin: Technik, 1969. 747 p.
 13. Plastinin P. I. Reciprocating compressors. Vol. 1. Theory and calculation. M.: KolosS, 2006. 456 p. (in Russian)
 14. Khodyrev A. I., Shakhov A. V. Mathematical modeling of piston compressor stage malfunctions for technical diagnostics. *Territory of Neftegaz*. 2020. No. 1–2. pp. 46–54. (in Russian)
 15. Sarmanaeva A. F. Mathematical modeling of working processes of reciprocating compressors taking into account the actual shape of the working elements of ring valves: diss.... candidate of Technical Sciences. Kazan, 2015. 164 p. (in Russian)
 16. Khodyrev A. I., Martynov V. N. Mathematical modeling of a pumping and compressor unit for pumping gas-liquid mixtures. *Chemical and oil and gas engineering*. 2008. No. 4. pp. 19–22. (in Russian)
 17. Ravin A. A. Technical diagnostics of ship power equipment. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021. 240 p. (in Russian)
 18. Naumenko A. P. Introduction to technical diagnostics and non-destructive testing: textbook. Stipend. Omsk: Publishing House of OmSTU, 2019. 152 p. (in Russian)
 19. Myasnikov Yu. N. Reliability and technical diagnostics of ship power-mechanical systems (NTDIKA). St. Petersburg: Publishing House of the Central Research Institute named after Academician A. N. Krylov, 2008. 183 p. (in Russian)
 20. Mas A. O., Zhiltsov A. S., Okhonin V. A. Diagnostics of ship technical means by thermal imaging diagnostics. In the book.

- диагностики. В кн. Морские технологии: проблемы и решения. 2021. с. 59–62.
21. Грищенко Д. В. Информационно-измерительная система оперативного диагностирования судового роторного оборудования // Материалы XIV международной конференции «Региональная информатика-2014» (29–31 октября 2014 г., Санкт-Петербург). СПб.: СПОИСУ, 2014. С. 445–446.
 22. Оскома А. А., Суриков Д. Г. Инновационный способ (технология) изготовления пружин как средство повышения надежности машин и механизмов. // Интернаука. 2020. № 5 (87). с. 51–52.
 23. Байков И. Р., Китаев С. В., Файрушин Ш. З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3 (63). с. 28–30.
 24. Мясников Ю. Н., Никитин В. С., Раввин А. А. Эксплуатационные дефекты дизельных и газотурбинных двигателей. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 3 (385). с. 85–96.
 21. Grishchenko D. V. Information and measurement system of operational diagnostics of ship's rotary equipment. *Proceedings of the XIV International Conference «Regional Informatics-2014»* (October 29–31, 2014, St. Petersburg). St. Petersburg: SPOISU, 2014. pp. 445–446. (in Russian)
 22. Oskoma A. A., Surikov D. G. Innovative method (technology) of manufacturing springs as a means of improving the reliability of machines and mechanisms. *Inter Nauka*. 2020. No. 5 (87). pp. 51–52. (in Russian)
 23. Baykov I. R., Kitaev S. V., Fayrushin S. Z. Diagnostics of the technical condition of reciprocating compressors. *Energy security and energy conservation*. 2015. No. 3 (63). pp. 28–30. (in Russian)
 24. Myasnikov Yu. N., Nikitin V. S., Rabbi A. A. Operational defects of diesel and gas turbine engines. *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2018. No. 3 (385). pp. 85–96. (in Russian)

Сведения об авторах

Оскома Анатолий Архипович

К. т. н., Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А, oscomal@yandex.ru

Суриков Дмитрий Геннадьевич

К. т. н., Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А, surikov77@mail.ru

Information about authors

Oskoma Anatoly A.

Ph. D., ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, oscomal@yandex.ru

Surikov Dmitry G.

Ph. D., ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, surikov77@mail.ru



ХIII Международная специализированная выставка

4 – 7 октября 2022 г.

Тематики выставки:

- Энергоэффективность и энергосбережение при транспортировке энергетических ресурсов и выработке тепловой и электрической энергии.
- Энергосберегающие технологии в инженерных системах промышленных предприятий, зданий и сооружений.
- Энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы.
- Ресурсосберегающее ведение строительно-монтажных работ.
- Обеспечение безопасности при транспортировке, хранении и использовании топливно-энергетических ресурсов. Промышленная безопасность и экология.
- Учет и мониторинг энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов.
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами в промышленности, энергетике и в сфере потребления ТЭР.
- Диагностика. Неразрушающий контроль.
- Возобновляемые источники энергии (ВИЭ).
- Альтернативные источники энергии (АИЭ).
- Переработка и утилизация промышленных и бытовых отходов.
- Светотехника.

Место проведения:

Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1, КВЦ "Экспофорум"

Организатор выставки:

ООО "ФАРЭКСПО"

<https://energysaving-expo.ru/>