



ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВИБРОСПЕКТРОВ КОЛЕБАНИЙ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ МЕТОДАМИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СИСТЕМ

С.В.Китаев*¹, И.Р.Байков¹, О.В.Смородова¹, В.И.Семи²

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия;

²ООО «Научно-производственное объединение «Буровая техника», Москва, Россия

Interpretation of Bearings Vibrations Vibrospects of Gas-Pumping Units by Self-Organizing Systems Methods

S.V.Kitaev¹, I.R.Baikov¹, O.V.Smorodova¹, V.I.Semin²

¹FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russia;

²LLC «Burovaya tekhnika Scientific and Production Association», Moscow, Russia

Abstract

The article is devoted to the development of special methods for forecasting accidents of gas-pumping unites (GPU) based on the interpretation of the vibrational spectra of the oscillations of the low-pressure turbine thrust bearing housing (PMO TND) body case. When developing a complex defect, it is proposed to use the value of the correlation dimension, determined on the basis of the one-dimensional frequency range of the measured vibration velocity of the housing of the GUP TND GPA, as an additional criterion. It is shown that in the defect-free state of the gas pumping unit, the dependence of the correlation dimension of the strange attractor (v) on the dimension of the enclosed space (m) has the form of a curve with saturation and in the corresponding coordinates goes to the asymptotic horizontal boundary. If there is a danger of an emergency failure, then the saturation of the function $v(m)$ is not observed in the entire research area, the correlation dimension $v(m)$ increases monotonically with the enclosed space increasing dimension.

Keywords:

Vibrospectrum;
Amplitude;
Correlation dimension;
Attractor;
Phase space;
Deterministic chaos.

© 2019 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Магистральный транспорт природного газа в России является одной из отраслей промышленности, образующих бюджет страны [1]. Энергетическая эффективность перекачки магистрального газа [2] определяется техническим состоянием и режимом эксплуатации технологического оборудования компрессорных станций [3].

В динамическом процессе изменения режимных параметров газоперекачивающих агрегатов (ГПА) при его эксплуатации в течение жизненного цикла [4] принимают участие как термодинамические (например, температура, давление газа), так и механические параметры состояния агрегата (частота вращения ротора ГПА, амплитуда и частота колебания элементов агрегата в контрольных точках и др.). Целью работы явля-

ется восстановление направленности этой динамики исключительно на основе характеристик виброспектров.

Обозначим $A_0(f)$ - частотный ряд экспериментально определенных амплитуд виброскорости колебаний корпуса подшипникового узла турбины низкого давления ГПА. Введем в рассмотрение фазовое пространство переменных $\{A_k\}$ со значениями k в диапазоне от $k=0$ до $k=n-1$. Авторами [5] показано, что состояние агрегата в этой системе координат отображается точкой. Тогда последовательность проходящих ГПА состояний определяет некоторую кривую - фазовую траекторию. Если динамика ГПА сводится к уравнениям процессов рассеивания энергии, то с течением времени в системе устанавливается некоторый стабильный режим. Это проявляется в конвергенции совокупности фазовых траекторий к аттрактору - некоторому вложенному фазовому пространству [5].

*E-mail: svkitaev@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20190100381>

Таким образом, при изучении временных трендов жизни и старения ГПА по экспериментальной последовательности амплитуд виброскорости стоит задача идентификации аттрактора (при условии его существования). Иными словами, необходимо определить, являются ли свойства объекта проявлением детерминированной динамики стороннего внешнего воздействия, или его свойства определены некоторым собственным шумовым процессом [6].

При однозначном подтверждении существования аттрактора определяющую роль в установлении характера динамики ГПА играет его размерность v [7]:

- если $v=1$, то состояние агрегата характеризуется незатухающими механическими колебаниями;
- если $v=2$, то в динамике агрегата присутствуют квазипериодические колебания со значительно разнящимися частотами;
- если v - нецелое значение и превышает величину $v=2$ (случай существования аттрактора), то можно предположить, что в поведении системы будет преобладать шумовая компонента.

В работах [7, 8] показано, что для решения этой задачи необходимо определить комплекс переменных – координат фазового пространства. С этой целью рекомендуется исходную скалярную последовательность амплитуд виброскорости $A_0(f)$ преобразовать в ряд наборов с последовательно возрастающими сдвигами, кратными характерному запаздыванию r ($r=m\Delta f$, где m имеет целочисленное значение, Δf – характерный сдвиг в выборке). Таким образом, мы приходим к следующему набору переменных:

$$\begin{aligned} A_0: & A_0(f_1), \dots, A_0(f_N), \\ A_1: & A_0(fr+r), \dots, A_0(f_N+r); \\ A_{n-0}: & A_0(f_1+(n-1)r), \dots, A_0(f_N+(n-1)r). \end{aligned}$$

При соответствующем подборе r можно предположить, что переменные из установленного набора будут линейно независимы, как и требует концепция фазового пространства. Кроме того, эти переменные можно получить из единого частотного ряда $A_0(f)$, определенного экспериментально. Таким образом [7], информации виброспектра достаточно, чтобы представить динамику системы в многомерном фазовом пространстве. При этом динамику системы по частотам спектра можно представить как движение точки по странному аттрактору. Авторами [7-9] показано, что странные аттракторы являются фрактальными множествами, их главные свойства определяются размерностными характеристиками – например, размерностью Хаусдорфа. Наиболее просто на основе экспериментальных данных определяется фрактальный размерный критерий странных аттракторов - корреляционная размерность v . Ее значение вычисляется с помощью корреля-

ционного интеграла:

$$C(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \Theta(\varepsilon - |\bar{A}_i - \bar{A}_j|)$$

где ε - радиус корреляции;

$\Theta(z)$ - функция Хевисайда:

$$\Theta(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0. \end{cases}$$

В формуле вычисления корреляционного интеграла A_i – вектор положения точки в координатном пространстве на частоте $f_i=f_0+ir$ ($i=1, N$), где r - некоторый частотный промежуток, N - объем выборки. Корреляционный интеграл показывает усредненную вероятность того, что состояния системы в два различных момента времени кажутся близкими, а его численное значение определяет долю пар точек, расстояние между которыми в фазовых координатах не превышает ε . При малых радиусах корреляции ε значение корреляционного интеграла составляет величину около εv . В соответствии с этим, размерность v можно определить как степень по углу наклона линии зависимости $\ln(C)$ от $\ln(\varepsilon)$. При интерпретации состояния ГПА по результатам вибродиагностики доступной практически наблюдению является лишь одна из компонент вектора $A(f)$ - амплитуда виброскорости. В таких случаях для идентификации размерности странного аттрактора v обращаются к алгоритму П. Такенса [10].

Обозначим A_i - одну из координат фазового пространства системы $A(f): A_i=A(f_i), i=1, 2, \dots, N$. Введем в рассмотрение вложенное фазовое пространство с размерностью m . Тогда координаты точек определяются векторами

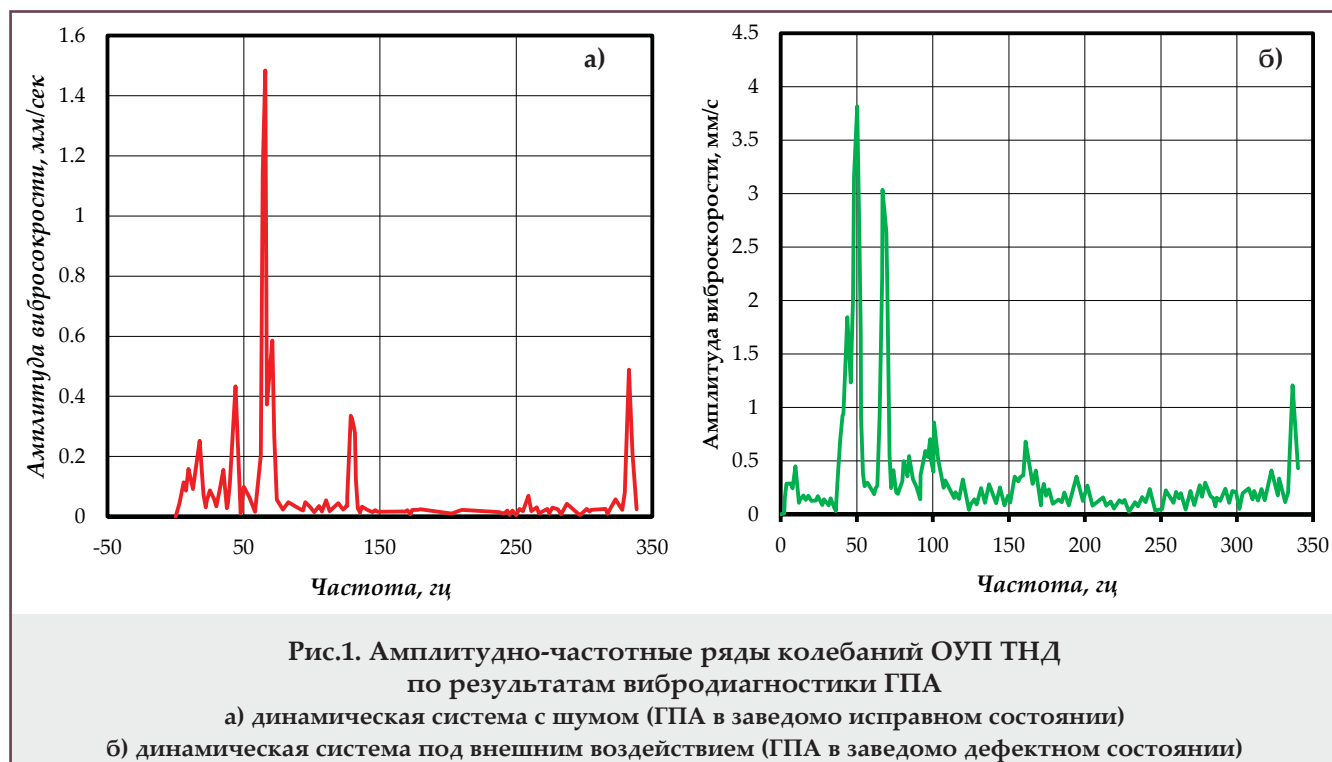
$$\bar{y}_j^{(m)} = \{A_j, A_{j+1}, \dots, A_{j+m-1}\}$$

из последовательных значений A ($j=1, 2, \dots, n=N-m+1$). Изменяя частоту f , получим траекторию некоего множества с корреляционной размерностью v_m . Ее значение следует определить по величине корреляционного интеграла

$$C_m(\varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \sum_{j,k=1}^n \Theta(\varepsilon - |\bar{y}_j^{(m)} - \bar{y}_k^{(m)}|)$$

по углу наклона зависимости $\ln C_m$ от $\ln \varepsilon$ в соответствующих координатах.

Изменяя размерность векторов y , будет получена взаимосвязь размерности вложенного пространства v_m и m . Показано, что при малых значениях m размерность v_m увеличивается с ростом m . Однако если изучаемый сигнал отображает некоторую направленную динамику, то при определенном $m=m_0$ функция v_m асимптотически ограничивается. Достигнутое при этом значение v_{m_0} и является размерностью v странного аттрактора. В случае, когда рост v_m не ограничивается асимптотой, это показывает шумовую природу сигнала. Это значит, что шумовой процесс соответствует движению динамической системы на аттракторе с размерностью $v_{m_0}=\infty$ [11]. Таким



образом, необходимость реализации отличия детерминированного сигнала системы от технологических шумов является конечной задачей при диагностировании оборудования.

Исходными данными для оценки механического состояния ГПА явились вибрационные амплитудно-частотные ряды для заведомо исправного (рис.1а) и заведомо предаварийного (рис.1б) состояния оборудования. Визуальный анализ виброспектров показал, что изменения амплитуд виброскорости в частотном ряду не показывают определенной закономерности.

Наблюдающееся последовательное усложнение структуры частотного ряда виброскорости напоминает известные сценарии перехода динамической системы к детерминированному хаосу [7]. Возможно, хаотические на первый взгляд изменения амплитуды виброскорости по частотам сигнала являются отображением некоего внешнего динамического направленного воздействия.

Реализация метода оценки механического состояния агрегатов по значению корреляционной размерности виброспектров колебаний подшипниковых узлов была выполнена на базе результатов виброобследований, соответствующих двум группам режимов работы ГПА:

- группа 1 - заведомо исправное оборудование;
- группа 2 - заведомо дефектное оборудование.

Зависимость $\ln C$ от $\ln \varepsilon$ была идентифициро-

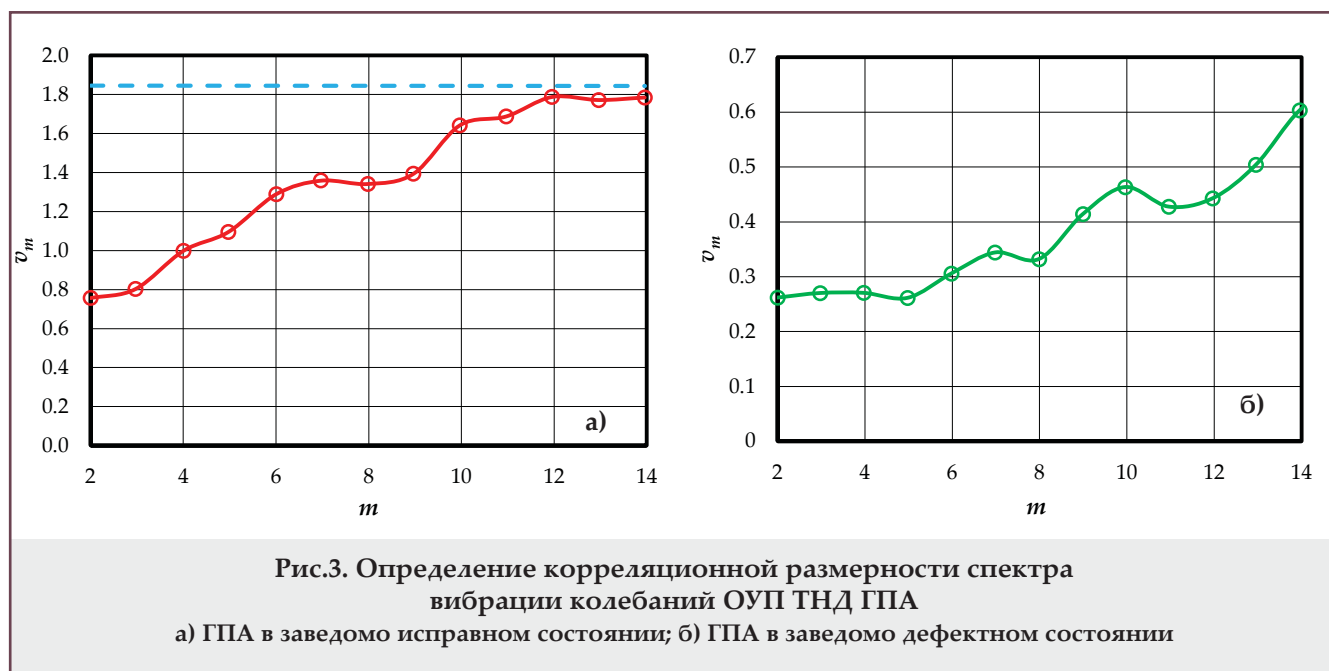
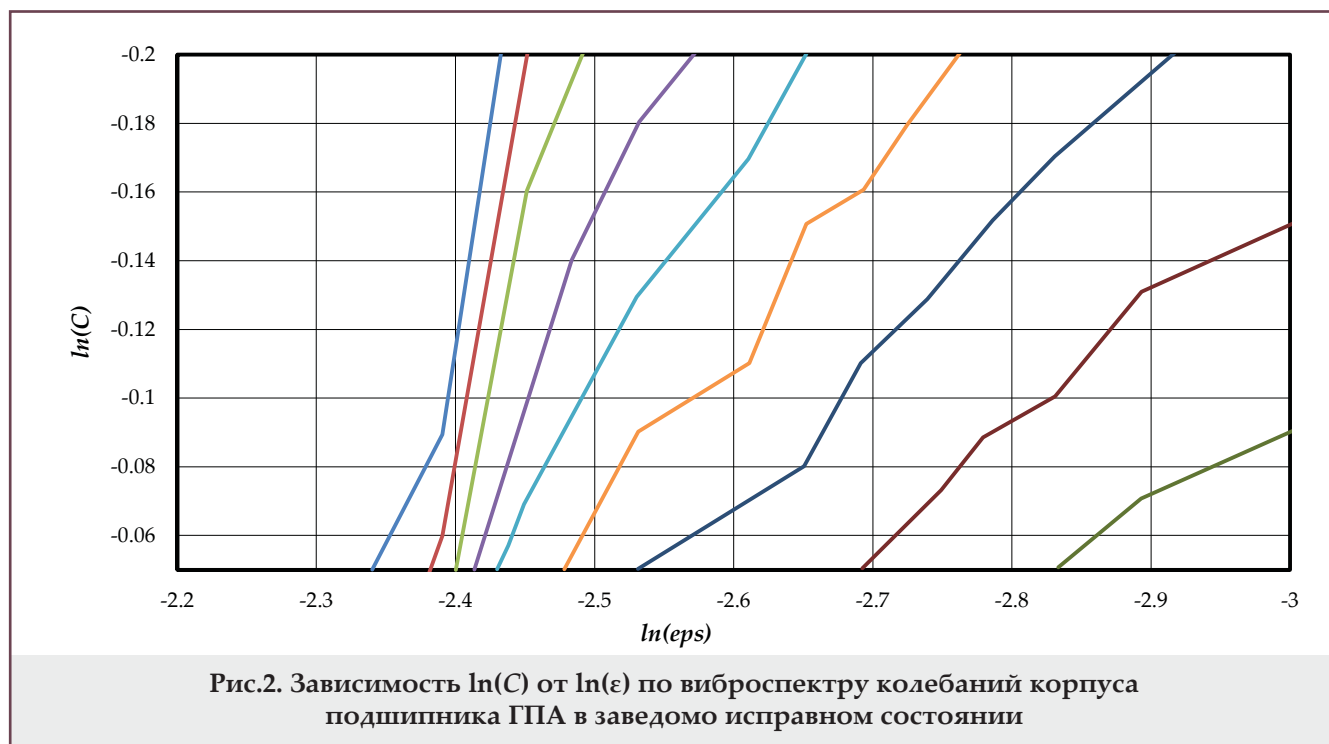
вана расчетами корреляционного интеграла $C(\varepsilon)$ по приведенным формулам. Радиус корреляции ε принимался в диапазоне (0...2000) с дискретностью 20. Максимальное значение радиуса корреляции ε было выбрано значительно выше размаха амплитуд виброскорости в частотном ряду спектра. Кроме того, для всех значений размерности вложенного пространства $m \in [2; 15]$ было обеспечено асимптотическое поведение величины $\ln C$ на нулевом пороге.

На рисунке 2 представлены результаты анализа одного из спектров группы 1. Результаты расчетов демонстрируют достаточно широкую область, где зависимость $\ln C$ от $\ln \varepsilon$ линейна в соответствии с уравнением $\ln C = v \times \ln \varepsilon$.

Тангенс угла наклона кривых $\ln C(\ln \varepsilon)$ при каждом значении $m \in [2; 15]$ определен расчетом и показан в виде графика (рис.3а). Видно, что зависимость асимптотически приближается к значению насыщения при $m = 14$. Соответственно, корреляционная размерность составляет 1.85 – значение тангенса угла наклона на режиме насыщения.

Результаты аналогичных расчетов для спектров виброскорости колебаний подшипников агрегатов в заведомо дефектном состоянии показаны на рисунке 3б.

Расчеты показали, что асимптотического поведения зависимости $\ln C(\ln \varepsilon)$ во всем диапазоне $m \in [2, 15]$ не наблюдается, величина $v(m)$ монотонно увеличивается.



Выводы

При неоднозначных результатах в классификации вибрационных спектров виброскорости при оценке механического состояния роторных элементов ГПА, в качестве дополняющего базу показателей критерия рекомендуется значение корреляционной размерности скалярного преобразования частотного ряда измерений амплитуд виброскорости колебаний подшипниковых узлов агрегатов.

При бездефектном состоянии турбины низкого давления зависимость $v(m)$ имеет вид кривой с асимптотическим поведением. При наличии одного или нескольких одновременно развивающихся дефектов функция $v(m)$ во всей области исследований имеет монотонно возрастающий характер, в графической зависимости $v(m)$ асимптота не наблюдается.

Литература

1. Бахтизин, Р. Н., Мустафин, Ф. М., Быков, Л. И. и др. (2016). Сооружение и эксплуатация трубопроводов. Инновации и приоритеты. *SOCAR Proceedings*, 3, 52-58.
2. Аргунова, К. К., Бондарев, Э. А., Рожин, И. И. (2016). Аналитические уравнения состояния природных газов и их роль в математическом моделировании. *SOCAR Proceedings*, 4, 41-48.
3. Кучерявый, В. И., Савич, В. Л., Мильков, С. Н. (2018). Оценка надежности подземного нефтегазопровода по критерию устойчивости. *SOCAR Proceedings*, 4, 59-64.
4. Дышин, О. А. (2016). Вейвлет-метод решения задачи нестационарной фильтрации жидкости в трещиновато-пористом кольцевом пласте. *SOCAR Proceedings*, 1, 67-79.
5. Мирзаджанзаде, А.Х., Султанов, Ч.А. (1995). Диакоптика процессов нефтеотдачи пластов. *Баку: Азербайджан*.
6. Байков, И.Р., Смородова, О.В. (1998). Диагностирование технического состояния технологического оборудования газопроводов. *Газовая промышленность*, 6, 15-17.
7. Николис, Г., Пригожин, И. (1990). Познание сложного. *Москва: Мир*.
8. Байков, И. Р., Жданова, Т. Г., Гареев, Э. А. (1994). Моделирование технологических процессов трубопроводного транспорта нефти и газа. *Уфа: УНИ*.
9. Мирзаджанзаде, А. Х., Хасанов, М. М., Бахтизин, Р. Н. (1999). Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность. Неравномерность. Неоднородность. *Уфа: Гилем*.
10. Неймарк, Ю. И., Ланда, П. С. (1987). Стохастические и хаотические колебания. *Москва: Наука*.
11. Байков, И. Р., Смородова, О. В., Гареев, Э. А., Аминев, Ф. М. (1999). Методы теории самоорганизации для диагностирования неполадок ГПА. *Газовая промышленность*, 8, 25-28.

References

1. Bakhtizin, R. N., Mustafin, F. M., Bykov, L. I., et al. (2016). Construction and operation of pipelines. Innovations and priorities. *SOCAR Proceedings*, 3, 52-58.
2. Argunova, K. K., Bondarev, E. A., & Rozhin, I. I. (2016). Analytical equations of the state of natural gases and their role in mathematical modeling. *SOCAR Proceedings*, 4, 41-48.
3. Kucheryavy, V. I., Savich, V. L., & Milkov, S. N. (2018). Evaluation of the reliability of the underground oil and gas pipeline on stability criterion. *SOCAR Proceedings*, 4, 59-64.
4. Dyshin, O. A. (2016). Wavelet solving method of nonstationary liquid filtration problem in crack-porosity of circular form. *SOCAR Proceedings*, 1, 67-79.
5. Mirzadjanzade, A. Kh. & Sultanov, Ch. A. (1995). Diacoptics of oil recovery processes. *Baku: Azerbaijan*.
6. Baykov, I. R. & Smorodova, O. V. (1998). Diagnosis of the technical condition of the technological equipment of gas pipelines. *Gas industry*, 6, 15-17.
7. Nikolis, G. & Prigozhin, I. (1990). Cognition of the complex. *Moscow: Mir*.
8. Baykov, I. R., Zhdanova, T. G., & Gareyev, E. A. (1994). Modeling of technological processes of pipeline transport of oil and gas. *Ufa: UNI*.
9. Mirzadjanzade, A. Kh., Hasanov, M. M., & Bahtizin, R. N. (1999). Study about simulation of complicated systems in oil & gas recovery. Nonlinearity. Nonequilibrium. Uncertainty. *Ufa: Gilem*.
10. Neymark, Yu. I. & Landa, P. S. (1987). Stochastic and chaotic oscillations. *Moscow: Nauka*.
11. Baykov, I. R., Smorodova, O. V., Gareyev, E. A., & Aminev, F. M. (1999). Methods of the theory of self-organization for diagnosing GPA problems. *Gas industry*, 8, 25-28.

Интерпретация виброспектров колебаний подшипниковых узлов газоперекачивающих агрегатов методами самоорганизующихся систем

С.В.Китаев¹, И.Р.Байков¹, О.В.Смородова¹, В.И.Семин²

¹Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия;

²ООО Научно-производственное объединение
«Буровая техника», Москва, Россия

Реферат

Статья посвящена разработке специальных методов прогнозирования аварий газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на основе интерпретации вибросигналов подшипниковых узлов ГПА. При развитии сложного дефекта, вызывающего затруднения в идентификации виброспектров, в качестве дополняющего диагностическую базу показателя рекомендуется использовать количественный критерий - корреляционную размерность, определенную на основе одномерного частотного ряда измеренной виброскорости колебаний корпуса ОУП ТНД ГПА. Показано, что при бездефектном состоянии ГПА зависимость корреляционной размерности странного аттрактора (v) от размерности вложенного пространства (m) имеет вид зависимости с асимптотическим поведением. Если же в конструкции ГПА имеется развивающийся дефект, то функция $v(m)$ во всем диапазоне рассмотрения имеет монотонно возрастающий характер.

Ключевые слова: виброспектр; амплитуда; корреляционная размерность; аттрактор; фазовое пространство; детерминированный хаос.

Özünü təşkil edən sistemlər metodu ilə qazvurucu aqreqlərinin yastıq düyünlərinin rəqslərinin vibrospektrlərinin interpretasiyası

S.V.Kitayev¹, İ.R.Baykov¹, O.V.Smorodova¹, V.İ.Semin²

¹«Uxta Dövlət Texniki Universiteti» Federal Dövlət
Büdcəhesablı Ali Təhsil Müəssisəsi, Uxta, Rusiya

²«Qazma texnikası» Elmi-istehsalat Birliyi MMC, Moskva şəhəri, Rusiya

Xülasə

Rusiyanın magistral təbii qaz nəqliyyatı ölkənin büdcəsini yaradan sənaye sahələrindən biridir. Magistral qazın vurulmasının enerji effektivliyi kompressor stansiyalarının texnoloji avadanlığının texniki vəziyyəti və istismar rejimi ilə təyin edilir. Məqalə qazvurucu aqreqlərin (QVA) yastıq düyünlərinin vibrosiqnallarının interpretasiyası əsasında qazvurucu aqreqlərdə baş verəcək qəzaların proqnozlaşdırılması metodlarının işlənməsinə həsr edilmişdir. Vibrospektrlərin identifikasiyasında çətinliklər yaradan mürəkkəb qüsurların inkişafı zamanı diaqnostika bazasını tamamlayan göstərici kimi kəmiyyət meyarından - qazvurucu aqreqlərin aşağı təzyiqli turbinlərinin dayaq yastıqlarının korpusunun rəqslərinin vibrosürətləri ilə ölçülən birölçülü tezlik sırası əsasında müəyyən edilmiş korrelyasiya ölçüsündən istifadə etmək tövsiyə edilmişdir. Göstərilmişdir ki, QVA qüsursuz vəziyyətdə olduqda qəribə attraktorun (v) korrelyasiya ölçüsünün daxil olan sahənin (m) ölçüsündən asılılığı asimptotik hərəkətli asılılıq şəklində olur. QVA-nın konstruksiyasında inkişaf edən qüsurlar olduqda isə $v(m)$ funksiyası baxılan diapazonda monoton artan xarakterə malik olur.

Açar sözlər: vibrospekt; amplituda; korrelyasiya ölçüsü; attraktor; faza sahəsi; determinasiyalaşmış xaos.