

УДК 622:004

РОБАСТНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДСТОЯЩИХ АВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Г.А.Гулуев
(Институт Кибернетики НАНА)

В статье определена структура робастной системы идентификации вибрационного состояния и прогнозирования предстоящих аварийных состояний компрессорных агрегатов. Программное обеспечение системы разработано на основе помехотехнологий анализа сигналов вибрации от точек контроля вибрации. Приведены результаты эксплуатации системы на Бакинском нефтеперерабатывающем заводе им. Гейдара Алиева.

Ключевые слова: компрессорная станция, вибрационный контроль, помехотехнология, робастный корреляционный анализ, робастный спектральный анализ.

Адрес связи: scb_06@mail.ru

DOI: 10.5510/OGP20120300126

Введение

Известно, что одним из основных объектов нефтегазопроводов являются компрессорные станции (КС). Они также являются важными производственными объектами крупных нефтехимических комплексов. Поэтому для обеспечения безаварийной, бесперебойной и эффективной работы этих стратегически важных отраслей промышленности необходимо создание надежных информационных систем мониторинга и диагностики технического состояния КС и прогнозирования их аварий.

Известно также, что во время эксплуатации все элементы (узлы) КС подвергаются непрерывным, качественным изменениям [1-6]. Совокупность внутренних свойств этих элементов в некоторый момент времени определяют состояние системы.

Проблемы мониторинга, диагностики и контроля технического состояния КС, особенно остро стоят в настоящее время, тогда как показатели конструкций и машин достигли предельных значений, а последствия аварий приобретают все более серьезный и даже катастрофический характер. Однако известные методы анализа не позволяют заранее прогнозировать аварии на КС и диагностические системы сигнализируют о начале отказа, когда предотвратить его практически невозможно. В связи с этим создание новых технологий, алгоритмов и систем мониторинга и контроля, учитывающих микроизменения в узлах (элементах) КС и позволяющие на ранних этапах обнаружить зарождающиеся дефекты в контролируемой КС является актуальной задачей.

Постановка задачи

Известно, что причинами отказов КС могут быть [5-9]:

- износ элементов и узлов оборудования;
- нарушение инструкции по эксплуатации и превышение проектных нагрузок;
- технологические и конструктивные недостатки;
- дисбаланс машины и несоосность (смещение осей);
- механический резонанс связанных структурных элементов;
- работа машины около критической скорости;

- сдвиг в течение времени работы (косвенное смещение) втулок;
- временная остановка (прерывание) в связи с неисправностью регулятора и высокоскоростного пробега;
- нестабильность, возбуждаемая под гармоническими частотами.

Хотелось бы подчеркнуть, что внедрение методов комплексного мониторинга и диагностирования в практику технического обслуживания промышленного оборудования, в том числе КС, позволяет выявлять дефекты машин и их отдельных узлов на ранней стадии их развития [10-14].

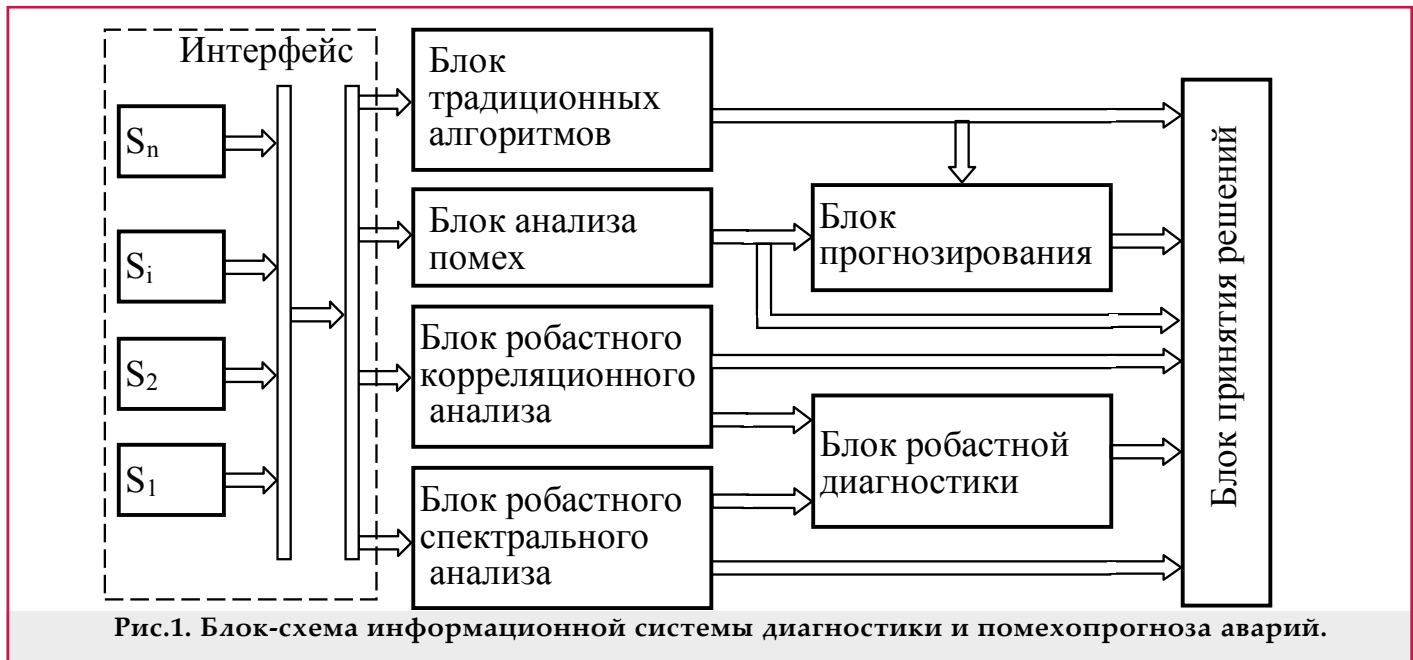
По данным Американского Общества Инженеров-Механиков до 82% неисправностей машин с вращающимися узлами могут быть определены методами вибрационной диагностики [15, 16].

Разнообразие дефектов, обнаруживаемых методами вибрационной диагностики, и сложность сигналов, порождаемых неисправностями и колебаниями деталей КС, заставляет при выявлении и измерении диагностических параметров применять различные виды обработки сигналов [11, 13, 17-24].

Для реализации обработки сигналов в вибродиагностике КС применяются: спектральный и автокорреляционный анализы сигналов, вейвлет анализ, анализ сигнала методом накопления, выделения огибающей сигнала (детектирования, синхронное детектирование сигнала), спектральный анализ огибающей [11, 14, 17, 22].

В настоящее время возникла необходимость к переходу на технологию эксплуатации и обслуживания машин и оборудования по техническому состоянию, в которой источником информации о техническом состоянии машин и оборудования, работающих в стационарном режиме, является виброакустический сигнал. Изменение свойств виброакустического сигнала коррелированы с изменением параметров технического состояния, вызванного деградацией узлов, изменением геометрических размеров деталей и др. [14, 6, 9].

Для обнаружения неисправностей в КС на начальной стадии развития дефекта применяются алгоритмы сравнения спектров работающего ком-



прессора с эталонными спектрами. Однако здесь трудности связаны с выбором необходимого числа спектральных составляющих, а также подходящего числа спектральных составляющих, подлежащих анализу.

Выявление дефектов, возникновение которых обуславливается силовым возбуждением вибрации, осуществляется с помощью анализа спектральных составляющих, связанных с частотой вращения ротора.

В результате исследования КС были выявлены основные дефекты, появление которых сопровождается высоким уровнем вибрации и связано с частотой вращения ротора и кратными с ней гармоническими составляющими:

- нормальное состояние;
- дисбаланс ротора;
- изгиб корпуса в зоне упора;
- увеличение вертикального зазора в подшипниках;
- уменьшение напряжения;
- потеря напряжения;
- дисбаланс в зоне подшипников ЦВД;
- дисбаланс в зоне подшипников ЦНД;
- высокая вибрация в точках соединения к корпусу;
- расцентровки валов ЦВД;
- расцентровки валов ЦНД;
- увеличение зазоров в подшипниках;
- дисбаланс зубчатой соединительной муфты;
- задевание муфты;
- образование отложения в рабочих колесах;
- передача силы и вибраций по трубам;
- повреждение в шейке вала или вкладыше;
- ослабление посадки деталей ротора на вал;
- осевой сдвиг ротора;
- нарушение в лабиринтных уплотнителях;
- нарушение в торцевых уплотнениях;
- ограничение относительных расширений движущихся частей;

• передача вибраций от рядом работающего агрегата.

До настоящего времени нет однозначной методики и алгоритмов диагностирования, а также конкретных признаков разделения этих дефектов, так как все они базируются на определении амплитуды

первой роторной гармоники.

В результате диагностические признаки этих дефектов не соответствуют требованиям однозначности и достаточности. Кратные роторные гармоники также фигурируют почти во всех случаях и только усложняют постановку точного диагноза. В результате достоверность диагностирования известных дефектов по-прежнему остается низкой. Следовательно, разработка алгоритмов и технологий переработки и анализа сигналов, позволяющих обнаружить дефект на ранних этапах его зарождения в процессе эксплуатации КС, а также идентифицировать род дефекта и диагностировать техническое состояние КС является актуальной задачей.

Робастная система идентификации вибрационного состояния и прогнозирования дефектов

На рисунке 1 приведена блок-схема предлагаемой робастной системы.

Отметим, что в системе особое внимание уделяется систематизации, обработке и анализу полученных виброметрических данных. В качестве исходных данных используются вибросигналы, отражающие механические колебания объекта в контрольных точках. Это обеспечивает получение самых разнообразных характеристик вибрационного состояния корпуса и различных механизмов с вращательными движениями, которые могут повлечь за собой поломку основных узлов и деталей КС.

В отличие от традиционных систем, в рассматриваемом варианте для исключения риска возможных аварий в информационной системе диагностики и помехопрогноза аварий для получения первичной информации о техническом состоянии диагностируемых механизмов применяется интерфейс, который передает от датчиков $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$, установленных на оборудовании КС, соответствующие сигналы:

$$g_1(i\Delta t), g_1(i\Delta t), \dots, g_i(i\Delta t), \dots, g_n(i\Delta t) \quad (1)$$

на выходе блоков традиционного, робастного корреляционного и робастного спектрального анализа помех.

Информационно в системе производится распараллеливание процессов помехопрогноза и диагностики. Для этого сигналы, получаемые от источников, параллельно передаются на входы всех блоков анализа. При этом на входе блока анализа помех определяются оценки характеристик помех, т.е.

$$\begin{aligned} D_{\varepsilon}, R_{g\varepsilon}(0), R_{g\varepsilon}(\mu), r_{g\varepsilon}, \lambda_{an}, \lambda_{anr} \\ D_{\varepsilon}^p(0), R_{g\varepsilon}^p(0), r_{g\varepsilon}^p, \lambda_{an}^p, \lambda_{anr}^p \end{aligned} \quad (2)$$

В блоках корреляционного и спектрального анализа эти оценки используются для обеспечения робастности статистических характеристик сигналов, полученных по традиционным алгоритмам [1-5, 25, 26], т.е.

$$\begin{aligned} D_g^p = D_g - D_{\varepsilon}, \quad R_g^R = R_g^R(0) - R_{g\varepsilon}(0), \dots \\ a_n^R = a_n - \lambda_{an}, \quad b_n^R = b_n - \lambda_{bn} \end{aligned} \quad (3)$$

В результате устраняется зависимость величин этих оценок от помех и благодаря этому повышается достоверность и надежность результатов диагностики. Естественно, что при стабильном состоянии КС эти величины будут стабильными. Однако, когда изменения в состоянии оборудования приобретают явно выраженный характер, это отражается на оценках суммарных сигналов, что в свою очередь влияет на результат решения задачи диагностики.

Данная технология, в отличие от традиционных методов, дает возможность не только диагностировать, но и заблаговременно прогнозировать переход оборудования в новое состояние. Этот процесс в общем виде можно представить как совокупность трех составляющих: множество W возможных состояний объекта, множество V информативных признаков и правило идентификации F , сопоставляющее каждый элемент W с элементом множества V и наоборот. Множество W состоит из подмножества W_g^* робастных оценок статистических характеристик сигналов и подмножества W_{ε} оценок помех, которые определяются в соответствующих блоках. Элементы множеств W и V – векторные величины, они характеризуются не одним, а несколькими численными параметрами.

Вначале система помехопрогноза работает в режиме обучения и для различных состояний компрессорного оборудования по соответствующим алгоритмам в блоках прогнозирования определяются информативные признаки. На их основе создаются соответствующие эталонные подмножества W_g^* и W_{ε} .

На втором этапе по найденным комбинациям текущих оценок и по информативным признакам подмножества W_g рассматривается возможность констатации факта изменения состояния оборудования и решается задача его идентификации. По отличию комбинаций текущих оценок помех $\varepsilon_1(i\Delta t)$, $\varepsilon_2(i\Delta t), \dots, \varepsilon_n(i\Delta t)$ от соответствующих эталонных элементов W_{ε} определяется наличие микроизменений и путем идентификации состояния формируются результаты помехопрогноза. При этом процесс обучения продолжается и в случае обнаружения новых комбинаций информативных признаков, информация об этом вводится в виде соответствующих эталонных элементов подмножеств W_g и W_{ε} .

Третий этап работы системы отличается тем, что обучение прекращается и в каждом цикле по полученным комбинациям оценок помех и зашумленных сигналов путем идентификации с эталонными элементами подмножеств W_g и W_{ε} формируется либо помехопрогноз микроизменений, либо диагностика явно выраженных изменений, либо констатируется стабильность состояния диагностируемого объекта.

4. Результаты внедрение системы на нефтеперерабатывающем заводе им.Гейдара Алиева

При исследованиях КС (центробежного двухцилиндрового восьмиступенчатого компрессора типа МК 301/2) было выявлено, что каждый ее узел является источником вибрации. В результате анализа современного уровня системы мониторинга, диагностики и прогноза технического состояния КС и эксплуатационных данных последних, выбраны следующие точки диагностического контроля (рис.1):

- в электродвигателе - 4 точки;
- в первом и во втором редукторах по - 2 точки;
- в ЦНД - 2 точки; в ЦВД - 2 точки;
- в опорных точках - 3 точки. Всего 15 точек:
- в ЦВД: 1, 2 - вертикальные; 3 - в корпусе;
- в ЦНД: 6, 7 - вертикальные; 8 - в корпусе
- в редукторах P1, P2: 4, 5, 9, 10 - вертикальные;
- в электродвигателе: 12, 13 - вертикальные; 11, 14 - по оси; 15 - в корпусе.

В указанных 15-ти точках для диагностики технического состояния компрессорного агрегата самым оптимальным является установка первично-

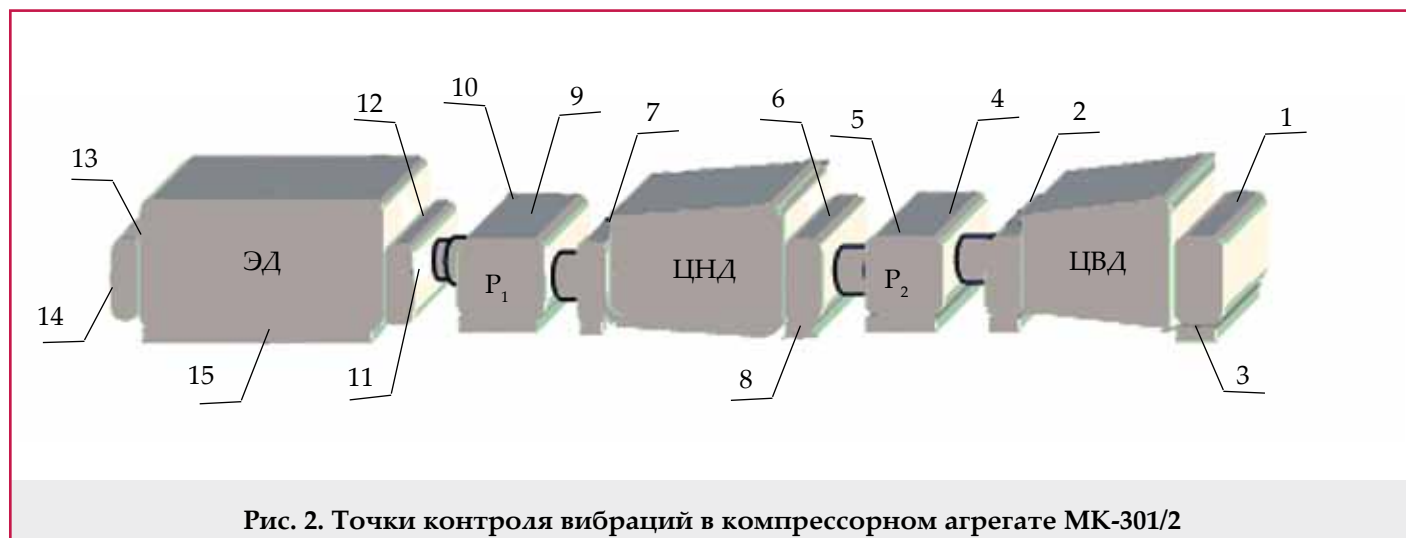


Рис. 2. Точки контроля вибраций в компрессорном агрегате МК-301/2

го преобразователя вибраций фирмы Bruel & Kjaer Vibro типа ASA-062.

Выход данного акселерометра является аналоговым сигналом и через барьер безопасности (AC-297) подключается к усилителю типа 2694 A [25].

Сигнал с выхода усилителя поступает в контроллер типа Micro PC фирмы Fastwell.

Предложенная структура, осуществляющая эти процессы, представлена на рисунке 3.

На рисунках 4 и 5 показаны два случая диагно-

стики состояния агрегата. На оптимальном является установка первичного преобразователя вибраций фирмы Bruel & Kjaer Vibro типа ASA-062.

На рисунке 4 показан сигнал виброускорения и его спектр от датчика 8 и общее состояние оценено как нормальное.

На рисунке 5 показан сигнал виброскорости и его спектр. Состояние агрегата оценено как нормальное. Дополнительный анализ показал уменьшение напряжение на валу компрессорного агрегата.

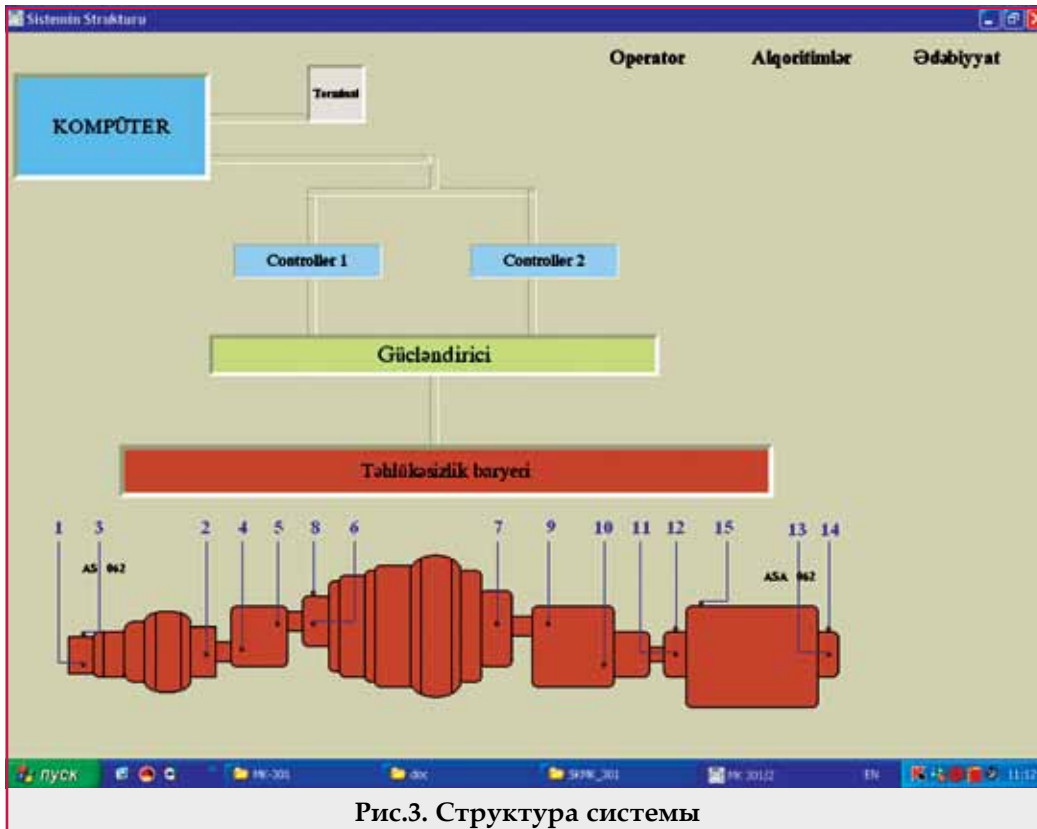


Рис.3. Структура системы

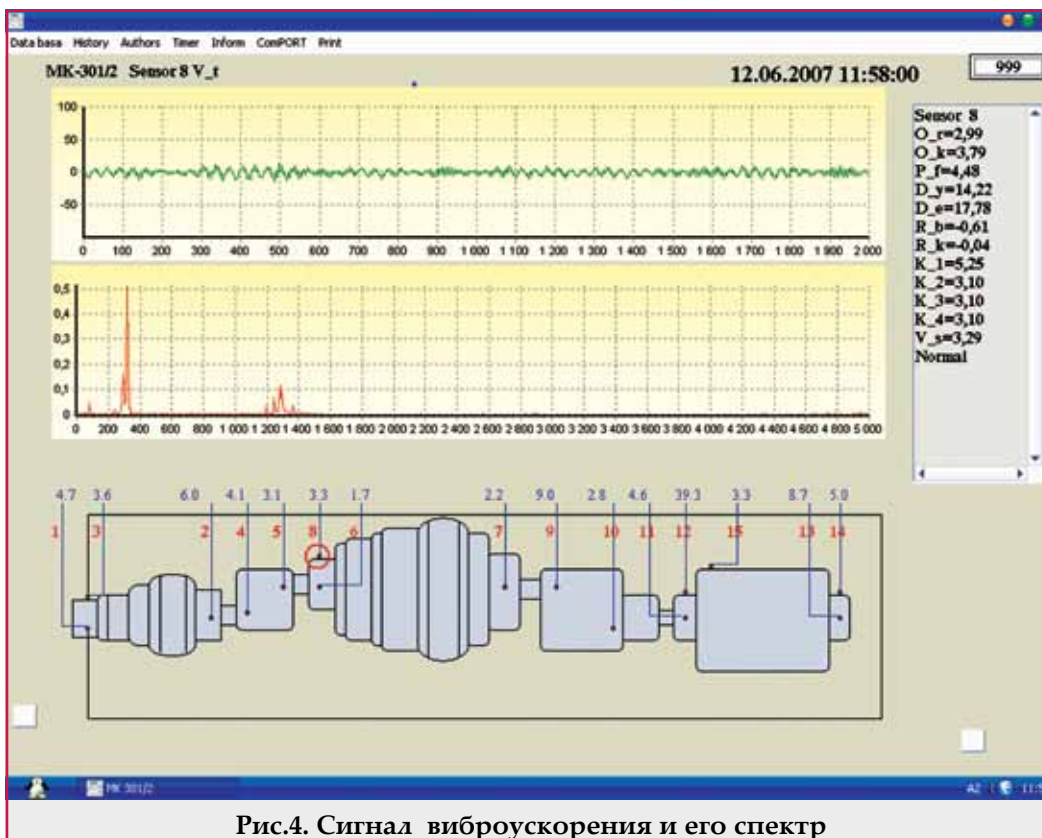


Рис.4. Сигнал виброускорения и его спектр

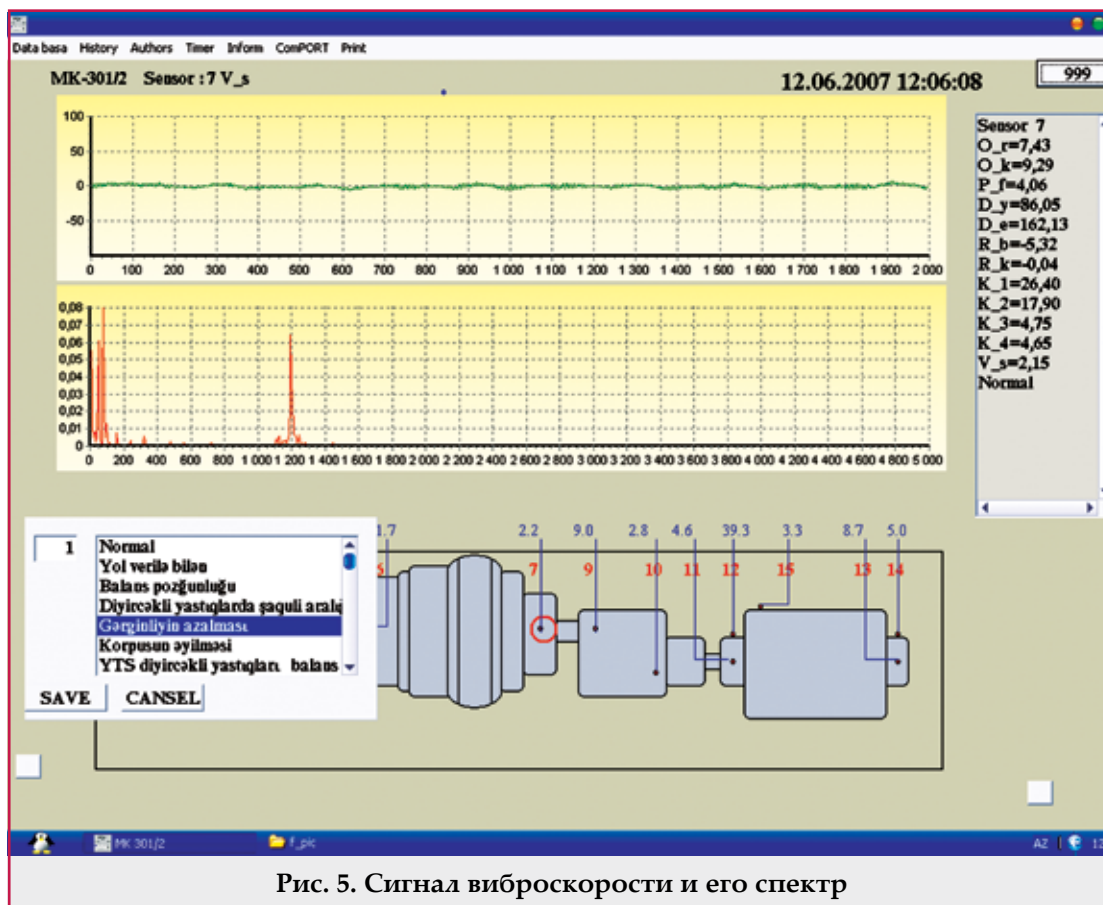


Рис. 5. Сигнал виброскорости и его спектр

Литература

1. Т.А.Алиев. Экспериментальный анализ. М.: Машиностроение, 1991.
(T.A.Aliev. Eksperimentalniy analiz. M.: Mashinostroeniye, 1991.)
2. Т.А.Алиев. Робастная технология статистического анализа. М.: Машиностроение, 2000, 191 с.
(T.A.Aliev. Robastnaya tehnologiya statisticheskogo analiza. M.: Mashinostroeniye, 2000.)
3. Т.А.Алиев, Г.А.Гулуев. Робастная информационная система прогноза аварий на компрессорных станциях магистральных нефтегазопроводов // Нефтяное хозяйство. М.: -2004. -№11. -С.112-114.
(T.A. Aliev, G.A. Guluev. The robust information system of failure forecast on compressor stations of trunk oil and gas pipeline // Oil industry. -2004. -No.11. -P.112-114.)
4. Т.А.Алиев, Г.А.Гулуев. Информационная система диагностики и помехопрогноза аварий на компрессорных станциях // Автоматика и вычислительная техника. -2003. -№6. -С.33-39.
(T.A.Aliev, G.A.Guluev. Informatsionnaya sistema diagnostiki i pomehoproгноza avariy na kompressornyh stantsiyah // Avtomatika i vychislitelnaya tehnika (Automatic Control and Computer Sciences). -2003. -№6. -S.33-39.)
5. J.D.Tison, K.E.Atkins. API 618 for Reciprocating compressors which pulsation and vibration control philosophy / 30-th turbomachinery symposium. The turbomachinery laboratory, Texas A and M University, Houston. TX, September, 2001.
6. J.D.Tison, J.C.Wachel, K.E.Atkins. Compressor vibration // 31-th Turbomachinery symposium, the turbomachinery laboratory, Texas A and M University, Houston, September, 2007.
7. Vibration measurement and analysis, 2005, http://www.bksv.com/pdf/vibro_meas_anal.pdf
8. J.C.Wachel, F.R.Szenasi, S.C.Denison S.C. Analysis of vibration and failure problems in reciprocating triplex pumps for oil pipelines // ASME Paper 85-PET-10, 1985.
9. J.C.Wachel. Turbine and compressor vibrations. CEP. Vol.15. American institute of chemical engineers, New York: 1973.
10. А.А.Ботаки, В.А.Ульянов, А.В.Шарко. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983.
(A.A.Botaki, V.L.Ulyanov, A.V.Sharko. Ultrasonic check of strength properties of structural materials. M.: Mashinostroenie, 1983)
11. Т.А.Алиев, Г.А.Гулуев, Ф.Н.Пашаев, А.В.Садыхов. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // Mechanical Systems and Signal Processing. -2012. -P.755-762.
12. Н.И.Бурау. Динамическая модель газотурбинного двигателя как объекта виброакустической диагностики усталостных трещин в лопатках рабочих колес // Вибрация в технике и технологии. -2001. -31(17). -С.28-32.
(N.I.Burau. Dinamicheskaya model gazoturbinного dvigatelya kak ob'yekta vibroakusticheskoy diagnostiki ustalostnyh treshin v lopatkah rabochih koles // Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyah. -2001. -31(17). -S.28-32.)
13. Н.И.Бурау, А.В.Зажичский, А.Н.Тяпченко. Классификация состояния объекта виброакустической диагностики с использованием нейротехнических структур // Авіаційно-Космічна техніка I технологія. -2002. -Вип.31. -С.181-185.
(N.I.Burau, A.V.Zazhitskiy, A.N.Tyapchenko. Klassifikatsiya sostoyaniya obyekta vibroakusticheskoy diagnostiki s ispolzovaniem neyrotekhnicheskikh struktur // Aerospace technic and technology. -2002. -Vip.31. -S.181-185.)

14. *Н.И.Бурай*. О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей //Вибрация в технике и технологиях. -2001. -№4 (20). -С.45-48.
(*N.I.Burau*. O novih napravleniyah v razvitii vibroakusticheskikh metodov diagnostiki prochnostnyh defektov v lopatkah gazoturbinnnyh dvigateley //Vibratsii v tekhnike i tehnologiyah. -2001. -№4 (20). -S.45-48.)
15. *Дж.Бендат, А.Пирсол*. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Недра, 1974.
(*J.Bendat, A.Pirsol*. The measurement and analysis of random processes. M.: Nedra, 1974)
16. *Дж.Бендат, А.Пирсол*. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.
(*J.Bendat, A.Pirsol*. Primeneniye korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza. M.: Mir, 1983.)
17. *В.Боровиков*. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Санкт-петербург, 2003.
(*V.Borovikov*. Iskusstvo analiza dannyh na komputere. SpB.: Sankt-Peterburg, 2003.)
18. *Ю.Н.Васильев, М.Е.Бесклетный, Е.А.Игуменцев и др.* Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газо-перекачивающих агрегатов. М.: Недра, 1987.
(*Yu. N.Vasiliev, M.E.Beskletnyi, E.A.Igumentsev et al.* Vibration monitoring of the technical condition of gas-turbine gas-transfer units. M.: Nedra, 1987.)
19. *М.И.Ведерников*. Компрессоры и насосные установки химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Учеб.пособие. М.: Высшая школа, 1987.
(*M.I.Vedernikov*. Kompresory i nasosniye ustanovki himicheskoy, neftehimicheskoy i neftepererativayushey promishlennosti. Ucheb.posobiye. M.: Visshaya shkola, 1987.)
20. Вибрация энергетических машин /Справочное пособие под ред. Н.В.Григорьева. М.: Машиностроение, 1974.
(*Vibratsiya energeticheskikh mashin /Spravochnoe posobie pod red. N.V.Grigoreva*. M.: Mashinostroeniye, 1974.)
21. *М.А.Балицкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова*. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984.
(*M.A.Balitskiy, M.A.Ivanova, A.G.Sokolova*. Vibroakusticheskaya diagnostika zarojdayushih defektov. M.: Nauka, 1984.)
22. *В.И.Воробьев, В.Г.Грибунин*. Теория и практика Вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999.
(*V.I.Vorobyev, V.G.Gribunin*. Teoriya i praktika veyvlet-preobrazovaniya. SpB.: VUS, 1999.)
23. *М.Д.Генкин, А.Г.Соколова*. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987.
(*M.D.Genkin, A.G.Sokolova*. Vibro-acoustic diagnostics of machines and mechanisms, M.: Mechanical engineering, 1987)
24. *Г.А.Гулуев*. Анализ современного уровня системы мониторинга, диагностики и помехопрогноза технического состояния компрессорных станций //Известия НАН Азербайджана. Серия физико-математических и технических наук. -2008. -Т.XXVIII. -№6. -С.98-108.
(*G.A.Guluyev*. Analiz sovremennogo urovnya sistemy monitoringa, diagnostiki i pomehoproгноza tehniceskogo sostoyaniya kompressornyh stantsiy //Izvestiya NAN Azerbaydjana. Seriya fiziko-matematicheskikh i tehniceskikh nauk. -2008. -T.XXVIII. -№6. -S.98-108.)
25. *Г.А.Гулуев, Д.Н.Мамедов, Ф.Г.Пашаев, Р.А.Меликов*. Принципы выбора технических средств для робастной информационной системы диагностики вибрационного состояния и прогноза аварий газоперекачивающих агрегатов //Известия НАН Азербайджана, серия физико-математических и технических наук. -2005. -32. -С.203-208.
(*G.A.Guluyev, D.N.Mamedov, F.G.Pashayev, R.A.Melikov*. Printsipy vibora tehniceskikh sredstv dlya robastnoy informatsionnoy sistemy diagnostiki vibratsionnogo sostoyaniya i prognoza avariyy gazoperekachivayushih agregatov //Izvestiya NAN Azerbaydjana. Seriya fiziko-matematicheskikh i tehniceskikh nauk. -2005. -T.32. -S.203-208.)
26. *T.Aliev*. Digital noise monitoring of defect origin. Lectures, notes in electrical engineering, springer 2007.

Robust system of identification of the vibratory condition and forecasting of forthcoming emergency conditions of compressor units

G.A.Guluev
(ANAS Cybernetics Institute)

Abstract

In article the structure of robust systems of identification of the vibratory condition and forecasting of forthcoming emergency conditions of compressor units is defined. On a basis of noise technologies of the analysis of vibration signals from the vibration control points the system software was developed. The results of operation of the system on Heydar Aliyev Baku Oil Refinery are given.

Kompressor aqreqlarının vibrasiya vəziyyətlərinin identifikasiyası və baş verə biləcək qəza vəziyyətlərinin proqnozlaşdırılmasının robast sistemi

Q.A.Quluyev
(AMEA Kibernetika İnstitutu)

Xülasə

Məqalədə kompressor aqreqlarının vibrasiya vəziyyətlərinin identifikasiyası və baş verə biləcək qəza vəziyyətlərinin proqnozlaşdırılması robast sistemin strukturu təyin edilmişdir. Sistemin proqram təminatı vibrasiya siqnallarının küy texnologiyaları ilə analizi əsasında yaradılmışdır. Sistemin Heydər Əliyev adına Bakı Neft Emalı zavodunda istismarının nəticələri verilmişdir.