

ISSN 0202-3350

СБОРКА



В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

3

2009

ASSEMBLING

IN MECHANICAL ENGINEERING,
INSTRUMENT-MAKING

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ**

СБОРКА



В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

**3 2009
(104)**

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Безъязычный В.Ф. Технологическое обеспечение комплекса параметров качества поверхности слоя и точности обработки на стадии технологической подготовки производства	3
Семенов А. Н. Методология системного подхода к проектированию сборки высокотехнологичных изделий	11

Технологическая оснастка для сборки

Воркуев Д.С. Обоснование условий надежного снятия разрезных резьбовых кулачков с завинченных шпилек при групповой автоматизированной сборке	15
Шуваев В.Г., Папшев В.А., Шуваев И.В. Ультразвуковой инструмент для сборки и разборки резьбовых соединений	18

Сборка с использованием клея

Тулинов А.Б., Гончаров А.Б. Исследование эксплуатационных характеристик анаэробных клеев и герметиков	21
--	----

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Костюков В.Н., Науменко А.П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин	27
Кравченко В.И., Костюкович Г.А., Кипнис М.Е., Красневский Л.Г., Адашкевич В.И. Модернизация стенда для испытания шлицевых соединений карданных валов	37
Плотников А.Л., Ханов Г.В., Крылов Е.Г. Обеспечение надежности работы сборного многоглавийного твердосплавного инструмента на автоматизированном станочном оборудовании	40

Справочный материал

Старжинский В.Е., Антонюк В.Е., Кане М.М., Шалобаев Е.В., Шилько С.В. Словарь-справочник по зубчатым передачам русско-английско-немецко-французский. Продолжение	45
---	----

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" – 79748, Объединенному каталогу "Пресса России" – 84967, каталогу "Почта России" – 60257) или непосредственно в издательстве Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

**Председатель
редакционного совета**
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

МОСКВА	Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.С. ВАСИЛЬЕВ	А.И. КУМЕНКО
(главный редактор)	А.В. МЕДАРЬ
А.А. ГУСЕВ	Е.А. МИКРИН
М.В. ВАРТАНОВ	Ю.Ф. НАЗАРОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ	В.В. ПОРОШИН
И.Н. ЖЕСТКОВА	Б.В. ШАНДРОВ
(зам. главного редактора)	А.А. ШАТИЛОВ
И.Н. ЗИНИНА	А.Г. ХОЛОДКОВА
Ю.Л. ИВАНОВ	Г.А. ЯРКОВ

Региональные председатели

АСТРАХАНЬ	ОРЕnbург
В.В. МИКИЯНСКИЙ	А.Н. ПОЛЯКОВ
БЕЛГОРОД	А.И. СЕРДЮК
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	А.П. ФОТ
БРЯНСК	РЫБНИК
О.А. ГОРЛЕНКО	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
ВЛАДИВОСТОК	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
Ю.Н. КУЛЬЧИН	А.Н. СЕМЕНОВ
А.А. СУПОНЯ	САМАРА
В.М. КОРНИЕНКО	М.В. ЕВДОКИМОВ
ВОЛГОГРАД	Ю.А. ВАШУКОВ
В.Г. КАРАБАНЬ	Г.А. КУЛАКОВ
М.Г. КРИСТАЛЬ	В.А. НИКОЛАЕВ
В.И. ЛЫСАК	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.М. ТРУХАНОВ	В.Ф. КУЗЬМИН
ИЖЕВСК	Е.В. ШАЛОБАЕВ
И.В. АБРАМОВ	ТОЛЬЯТИ
Б.А. ЯКИМОВИЧ	А.И. РЫЖКОВ
В.Г. ОСЕТРОВ	Б.Ф. ХАЗОВ
И.К. ПИЧУГИН	ХАБАРОВСК
КАЗАНЬ	В.А. ЛАШКО
Р.И. АДГАМОВ	Украина
КОВРОВ	КИЕВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ	А.С. ЗЕНКИН
КОЛОМНА	В.А. МАТВИЕНКО
Ю.Д. АМИРОВ	ДОНЕЦК
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ	А.Н. МИХАЙЛОВ
Б.Н. МАРЬИН	СЕВАСТОПОЛЬ
В.И. ШПОРТ	Е.Л. ПЕРВУХИНА
А.М. ШПИЛЕВ	ХАРЬКОВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ	Б.М. АРПЕНТЬЕВ
С.В. ДМИТРИЕВ	Беларусь
Р.М. ХИСАМУДИНОВ	МИНСК
ОМСК	В.Л. БАСИНЮК
В.Н. КОСТЮКОВ	Гомель
ОРЕЛ	В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
Ю.С. СТЕПАНОВ	ПОЛОЦК
Г.А. ХАРЛАМОВ	М.Л. ХЕЙФЕЦ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Н.М. КУЩ-ЖАРКО, Л.В. САВЕЛЬЕВА

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.



THE MONTHLY
NEWSMAGAZINE
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

3 2009
—
(104)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Bezazyshny V.F. Manufacturing support of perfection factors complex of surface layer and working accuracy on the process engineering stage 3

Semenov A.N. The methodology of system approach to high-technology production assembly design 11

Technological equipment for assembly

Vorkuev D.S. Validation of the conditions for reliable removal of split threaded cams from screwed pins in the process of automated group assembly 15

Shuvaev V.G., Papshev V.A., Shuvaev I.V. Ultrasonic tool assembling and disassembling of threaded connections 18

Assembly with use glue

Tulinov A.B., Goncharov A.B. Operational properties research of anaerobic adhesives and sealing components 21

Quality assurance. Testing. Monitoring

Kostiukov V.N., Naumenko A.P. Solutions of safe service problems of reciprocators 27

Kravchenko V.I., Kostukovich G.A., Kipnis M.E., Krasnevsky L.G., Adashkevich V.I.

Modernization of the stand for test spline joints of drive shaft 37

Plotnikov A.L., Hanov G.V., Krylov E.G. Creation reliable work of assembled multiedge tool from a firm alloy on automatic metal-cutting equipment 40

Reference source

Starzhinsky V.E., Antonjuk V.E., Kane M.M., Shalobaev E.V., Shilkov S.V.

The dictionary – hand-book on gearings (Russian-English-German-French).

A prolongation 45

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" 84967, the catalogue "Pochta Rossii" 60257) or directly in editorial of the journal.

Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.

<http://www.mashin.ru> E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru

Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4

The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board –
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

VASIL'EV A.S.
(Chief editor)
VARTANOV M.V.
DALSKY A.M.
GUSEV A.A.
ZHESTKOVA I.N.
(Deputy chief editor)
ZININA I.N.
IVANOV Y.U.L.
KOZYREV Y.U.G.

KUMENKO A.I.
MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

ASTRACHAN

MIKITANSKI V.V.

ORENBURG

POLYAKOV A.N.

BELGOROD

SERDUK A.I.

PELIPENKO N.A.

FOT A.P.

BRIANSK

RYBINSK

GORLENKO O.A.

BEZAZYSHNY V.F.

Vladivostok

NEPOMILUEV V.V.

KULSHIN Yu.N.

SEMENOV A.N.

KULSHIN Yu.N.

SAMARA

SUPONIA A.A.

EVDOKIMOV M.V.

KORNIENKO V.M.

VASHUKOV Yu.A.

VOLGOGRAD

KULAKOV G.A.

KRISTAL M.G.

NIKOLAEV V.A.

KARABAN' V.G.

ST.-PETERSBURG

LYSAK V.I.

KUZMIN V.F.

TRUKHANOV V.M.

SHALOBAEV E.V.

IZHEVSK

TOLIATI

ABRAMOV I.V.

KHAZOV B.F.

YAKIMOVICH B.A.

RYZHOKOV A.I.

OSETROV V.G.

KHABAROVSK

PITCHUGIN I.K.

LASHKO V.A.

KAZAN

Ukraine

ADGAMOV R.I.

KIEV

ZHITNIKOV Yu.Z.

ZENKIN A.S.

KOLOMNA

MATVIENKO V.A.

AMIROV Yu.D.

DONETSK

KHISAMUTDINOV R.M.

MIKHAILOV A.N.

MARIJN B.N.

SEVASTOPOL

SCHPORT V.I.

PERVUKHINA E.L.

SHPILEV A.M.

Kharkov

NABEREZHNYYE CHELNY

ARPENTIEV B.M.

DMITRIEV S.V.

Belarus

KHISAMUTDINOV R.M.

MINSK

KOSTIUKOV V.N.

BASINJUK V.L.

OREL

GOMEL

STEPANOV Yu.S.

STARZHINSKI V.E.

KHARLAMOV G.A.

POLOTSK

KHEIFETZ M.L.

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-and Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

Executive editors of current issue:
KUSH-ZHARKO N.M., SAVLEIEVA L.V.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

В.Н. Костюков, д-р техн. наук, А.П. Науменко, канд. техн. наук
(Научно-производственный центр "ДИНАМИКА")

Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин

Рассмотрены методические основы эксплуатации и ремонта поршневых машин, в частности компрессоров опасных непрерывных производств, по фактическому техническому состоянию с использованием систем мониторинга технического состояния в реальном времени. Приведены примеры эксплуатации и ремонта по показаниям системы мониторинга КОМПАКС®.

Methodical bases of operation and repair of piston machines, in particular, compressors of dangerous process productions, on an actual technical condition with use of systems of monitoring of a technical condition in real time are considered. Examples of maintenance and repair under indications of system of monitoring are resulted.

Ключевые слова: поршневые машины, поршневые компрессоры, мониторинг, диагностика, вибрация.

Key words: piston machines, reciprocating compressors, monitoring, diagnosis, vibration.

Критерием, определяющим качество эксплуатации и обслуживания поршневых машин (ПМ) различного назначения, является использование максимального их ресурса, с одной стороны, при обеспечении безопасности в случае аварийных и не-предсказуемых остановок ПМ с заданным уровнем последствий и потерь и, с другой стороны, при заданном уровне затрат на ремонт и восстановление работоспособного состояния ПМ.

Уровни последствий, потерь и затрат определяют исходя из назначения и областей применения ПМ. Так, при использовании ПМ, например, двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в общегражданских целях (автомобильный, железнодорожный транспорт и т.п.) на первый план выходит вторая составляющая – уровень затрат на ремонт и восстановление. Для ПМ, используемых на морском и речном флоте, в зависимости от вида объектов значительную роль играет первая составляющая – обеспечение безопасности – при достаточно боль-

шом весе второй. В тех сферах применения ПМ, в которых безопасность при отказе ПМ играет определяющую роль, например, в авиации, потенциально опасных объектах, первая составляющая имеет доминирующий вес.

Основным средством поддержания в рабочем состоянии существующего парка ПМ является *планово-предупредительный ремонт*. Интервалы между обслуживаниями и ремонтами, их объем и содержание определяют на основе статистических данных. При этом не учитывают особенности конкретной конструкции, реальные условия эксплуатации, в частности, стохастический характер нагрузок на ПМ, качество обслуживания, а рассматривают тип, модификацию ПМ, характер эксплуатации и т.п. Основанная на таком подходе *система обслуживания и ремонта ПМ и другого динамического оборудования имеет ряд недостатков*:

- ремонтно-регулировочным работам подвергают оборудование, находящееся в удовлетворительном состоянии и не нуждающееся в них;
- наступивший в период эксплуатации скрытый отказ устраниют только во время регламентных работ;
- внезапные отказы полностью устранить не удается, а на их количество и тяжесть существенное влияние оказывают не только условия эксплуатации, но и качество ремонтных работ, и качество замененных деталей и узлов;
- отсутствие на объектах и производствах качественных средств диагностики текущего технического состояния и качества ремонтных и регулировочных работ динамического оборудования, к которому относят и ПМ, приводят к снижению эффективности его функционирования, так как оборудование после ремонтно-регулировочных работ часто имеет характеристики, которые не соответствуют паспортным данным, например, повышенный расход, пониженную мощность, а автомобили, например, худшую динамику;
- отсутствие наблюдаемости текущего технического состояния (ТС) ПМ приводит к непредска-



зумым, часто аварийным остановкам машин, следствием которых являются не только экономические, но и существенные технические и экологические потери.

Существует достаточно большая сфера применения ПМ, где безопасность их эксплуатации является первостепенным и определяющим фактором. Это ПМ потенциально опасных производств предприятий нефтегазохимического комплекса (НХК).

Внезапная и аварийная остановка оборудования производств НХК создает угрозу не только появления значительных экономических потерь от простоев и восстановления их работоспособности, но и угрозу экологических и техногенных аварий и катастроф. В связи с этим весьма важным является получение не только достоверного, но и своевременного диагноза, который мог бы обеспечить безаварийную эксплуатацию с максимальным использованием ресурса заменяемых узлов и деталей.

Достичь этого можно только путем обеспечения постановки диагноза с интервалом времени меньшим, чем интервал развития неисправности. Для оборудования НХК этот интервал может лежать в пределах от нескольких минут до часов, дней, недель, месяцев.

Таким образом, безопасная ресурсосберегающая эксплуатация оборудования опасных производств неразрывно связана с мониторингом ТС этого оборудования. Термин "техническое состояние" предполагает пять видов состояний:

- исправное;
- неисправное;
- работоспособное;
- неработоспособное;
- предельное.

Однако сегодня условия эксплуатации требуют другой оценки возможностей эксплуатации, использования по назначению машинного оборудования и степени опасности дальнейшей эксплуатации.

В понимании специалистов служб эксплуатации и ремонта **техническое состояние** – это состояние объекта, при котором он способен выполнять свои функции в допустимых пределах отклонений функциональных количественных и качественных показателей, при заданном риске возникновения отказа, приводящего к прекращению выполнения своих функций. Как правило, используют четыре категории таких состояний [12]:

♦ **ХОРОШО (Х)** – допустимо при приемочных испытаниях после монтажа или капитального (среднего) ремонта. Соответствует исправному состоянию объекта и характеризует высокое качество ремонтных, монтажных работ и обкатки под нагрузкой.

♦ **ДОПУСТИМО (Д)** – допустимо при длительной эксплуатации. Характеризует полностью работоспособное состояние объекта при малой вероятности отказа. При достижении уровня Д контролируют скорость изменения измеряемых параметров.

♦ **ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР (ТПМ)** – допустимо при непродолжительной эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует ТПМ, если величина измеряемого параметра превышает уровень ТПМ или скорость роста параметра превышает уровень ТПМ при абсолютном значении параметра, превышающем уровень Д. Предупреждает о приближении ТС к предельному, наличии развивающихся дефектов, устойчивой постепенной утрате работоспособности и росте вероятности отказа. Служит основанием для проведения более частого текущего обслуживания и/или планомерного вывода агрегата в ремонт.

♦ **НЕДОПУСТИМО (НДП)** – недопустимо при эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует НДП, если величина измеряемого параметра превышает уровень НДП или скорость роста параметра превышает уровень НДП при абсолютном значении параметра, превышающем уровень Д. Характеризует наличие развитых дефектов либо высокую скорость их развития и достижение объектом предельного либо опасного состояния с высокой вероятностью отказа. Служит для немедленного останова агрегата и вывода его в ремонт. Продолжительность работы агрегата в состоянии НДП должна быть минимальна и определяется регламентом по выводу его из этого состояния.

Сегодня в задачу систем мониторинга входит определение не только вида ТС, но и неисправного механизма, узла, детали, т.е. элемента технического объекта, а также **прогнозирование ТС, что является общей задачей диагностики**. Для мониторинга состояния ПМ, к которым, прежде всего, относятся поршневые компрессоры (ПК), компримирующие взрывоопасные, вредные газы, а также ДВС, используемые в авиации, морском и речном флоте, кинематика, динамика и структурные параметры которых имеют много общего, необходимо обобщить опыт разработки методов и средств диагно-



стики, систем мониторинга и их применения на реальных производствах.

Решение столь сложной задачи, как мониторинг ТС, возможно на основе адекватного выбора методологии диагностирования и параметров, не только определяющих ТС, но позволяющих осуществлять диагностику. Системы мониторинга на основе вибродиагностики наряду с другими параметрами, характеризующими и определяющими ТС объекта, требуют обоснованного выбора совокупности параметров виброакустических (ВА) колебаний, позволяющих с минимальным риском пропуска отказа определять ТС объекта и осуществлять его диагностику.

Виброакустические колебания, источниками которых являются соударения в кинематических парах механизмов (поршень–цилиндр, клапан–седло и т.д.), обладают значительной информативностью [4, 11] с точки зрения величин структурных параметров, а также других процессов, генерирующих акустический сигнал. Косвенно ВА-колебания характеризуют величину зазора между сопряженными элементами ПМ, увеличивающуюся по мере износа трущихся поверхностей.

Однако ВА-диагностика ПМ требует использования иной по сравнению с центробежными машинами методологии формирования и выделения диагностических признаков. Определение необходимого и достаточного количества диагностических признаков, которые позволяли бы достоверно оценивать техническое состояние ПМ в целом, ее систем, механизмов и отдельных деталей, основывается на анализе физических процессов, протекающих в ПМ, и закономерностях их развития.

Поршневая машина, будь то ПК или ДВС, представляет собой сложную газомеханическую систему и является мощным и многофакторным источником ВА-сигналов, которая имеет **три основных источника**:

- неуравновешенность движущихся и вращающихся масс – силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс, центробежные силы инерции и моменты этих сил;

- газогидродинамические процессы – силы давления газов, протекание газа при впуске и выпуске, впрыск топлива, течение жидкости в насосе;

- соударения и трение между элементами и деталями узлов и механизмов.

Неуравновешенность движущихся и вращающихся масс вынуждает механизм колебаться как единое

целое относительно положения равновесия. Эти колебания характеризуются низкими частотами (десятки, сотни герц), сравнительно большими амплитудами перемещения и малыми ускорениями. Основная частота колебаний объекта равна и/или кратна частоте вращения неуравновешенных масс ротора, что является характерной чертой этого вида колебаний. Амплитуда колебаний пропорциональна квадрату угловой скорости вращения вала и зависит также от массы объекта и жесткости его крепления. Этот вид колебаний принято называть вибрацией.

Газогидродинамические процессы, соударения и трение между элементами и деталями узлов и механизмов отличаются высокими частотами (тысячи герц), малыми амплитудами смещения (доли мкм) и значительными ускорениями (десятки метров в секунду за секунду). Частоты этого вида колебаний определяются размерами, формой и упругими константами материала деталей, а также динамикой газовых и гидравлических процессов. Их амплитуда пропорциональна скорости столкновения деталей и течения газогидравлических носителей.

Такие колебания принято называть **акустическими колебаниями** или **структурным шумом**. В первом названии подчеркивается их физическая природа, в частности, тот факт, что эти колебания аналогичны акустическим явлениям, связанным с распространением упругих волн в газах, жидкостях и твердых телах. Колебания называют шумом независимо от их физической природы, если они имеют широкий спектр с непрерывным распределением составляющих по оси частот.

Обобщенно виброакустическим (ВА) сигналом принято называть физические величины, характеризующие механические колебания (вибрационные, акустические, гидроакустические), сопровождающие функционирование объекта, а диагностику – виброакустической.

Практический анализ ВА-сигнала предполагает анализ разнообразных его параметров. Учитывая, что в настоящее время основным способом получения ВА-информации является измерение ускорения с помощью пьезоэлектрического акселерометра, целесообразно рассмотреть взаимосвязь виброускорения с остальными параметрами ВА-колебаний.

Процесс преобразования перемещения в скорость или скорости в ускорение эквивалентен математической операции дифференцирования. Об-

ратное преобразование эквивалентно интегрированию. На практике дифференцирование приводит к росту шумовой составляющей сигнала, и поэтому его редко применяют. Интегрирование, напротив, может быть осуществлено с высокой точностью с помощью простых средств. Это является одной из причин, почему акселерометры сегодня стали основными датчиками ВА-сигнала: их выходной сигнал можно легко подвергнуть однократному или двукратному интегрированию.

Представляет интерес вопрос о влиянии операций дифференцирования и интегрирования на свойства получаемых случайных процессов с точки зрения суждения об их стационарности и эргодичности.

Если случайная функция стационарна, то ее производная тоже стационарна, по крайней мере, в широком смысле [1, 5]. Более строго – мгновенные значения случайного процесса и его производной, взятые в один и тот же момент времени, являются некоррелированными величинами. Более того, если случайный процесс является гауссовым, а при суммировании хотя бы пяти-шести гармонических колебаний со случайными и взаимно независимыми фазами получается случайный процесс, близкий к гауссовому [3], то процесс и его производная статистически независимы.

Таким образом, если измеряемый параметр (виброперемещение Se) является стационарным, то его производные (виброскорость Ve или вибрускорение Ae) могут приниматься также стационарными и некоррелированными без дополнительных проверок.

Точное математическое интегрирование стационарного процесса приводит к нестационарному процессу $\xi(t)$ с неограниченно возрастающей дисперсией $\mu_2\{\xi(t)\}$, который является Винеровским случайнм процессом [1], т.е. нормальным процессом с независимыми приращениями, для которого математическое ожидание $m_1\{\xi(t)\}$ и дисперсия $\mu_2\{\xi(t)\}$ определяются следующим образом:

$$m_1\{\xi(t)\} = 0, \quad \mu_2\{\xi(t)\} = \sigma^2 t,$$

где σ – среднеквадратичное отклонение исходного процесса.

Интегрирование сигнала приводит к перераспределению энергии сигнала в область низких частот и к появлению низкочастотного тренда, что и обуславливает нестационарность реализации по-

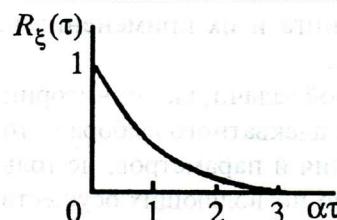


Рис. 1. Нормированная корреляционная функция

сле интегрирования. Следует иметь в виду, что идеальное интегрирующее устройство можно рассматривать как фильтр с бесконечно малой полосой пропускания. Процесс установления в таком фильтре длится бесконечно долго. Поэтому статистические характеристики интеграла случайного процесса существенно зависят от пределов, т.е. от длительности интегрирования τ .

Корреляционная функция на выходе реальной интегрирующей цепи имеет вид

$$B\xi(\tau) = \frac{N_0 \alpha}{2} \exp(-\alpha|\tau|),$$

где $\alpha = 1/RC$;

N_0 – спектральная плотность сигнала (в общем случае – стационарного случайного) на входе интегратора;

R и C – параметры цепи интегрирования.

А нормированная корреляционная функция (рис. 1) имеет вид:

$$R\xi(\tau) = \exp(-\alpha|\tau|).$$

При этом спектральную плотность (функция частоты ω) на выходе интегрирующей цепи определяют выражением:

$$S\xi(\omega) = \frac{2N_0}{1 + (\omega/\alpha)^2}.$$

Следовательно, на выходе физической интегрирующей цепи в установившемся режиме процесс является стационарным, как и на входе [5].

Исследования взаимной корреляции вибрускорения, виброскорости, виброперемещения, которые получены путем интегрирования (дифференцирования) ВА-сигнала, показывают, что при случайной компоненте с шириной спектра 3 кГц даже при отношении "сигнал/шум" 40 дБ значение меры Линдера не превышает 0,01, т.е. эти сигналы являются практически независимыми [2, 6].

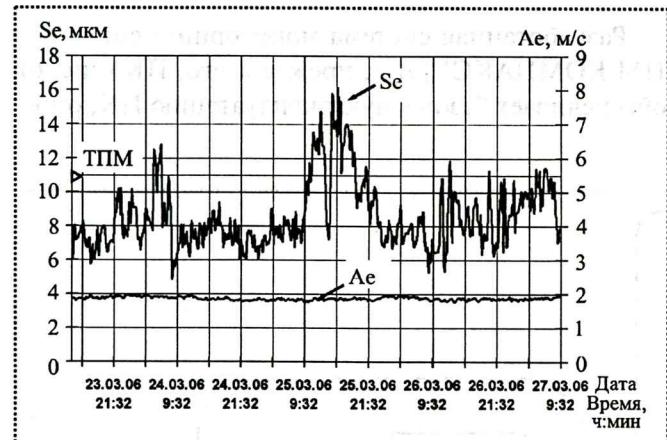


Рис. 3. Тренды вибропараметров с датчика над крейцкопфом

Таким образом, величина скорости не зависит от величины перемещения, так же как величина (значение) ускорения не зависит от величины скорости.

Практика ВА-диагностики подтверждает адекватность (достоверность) указанных выше выводов как для центробежных [6], так и для поршневых машин (рис. 2, см. 2-ю стр. обложки, рис. 3).

Тренды вибропараметров (см. рис. 2) получены с датчика, установленного на крышке цилиндра ПК, и отражают различный характер их реакции на заброс конденсата и возникновение гидроудара.

Тренды вибропараметров (см. рис. 3) получены с датчика, установленного над ползуном крейцкопфа. Из трендов видно, что на изменение зазора между ползуном и зеркалом направляющей адекватно реагирует виброперемещение.

Фундаментальным подходом к анализу и диагностике, связанным со сложностью ВА-процессов, генерируемых источниками ВА-колебаний, различием физических моделей и методов их математического описания на различных участках частотного диапазона, является *разбиение его на четыре поддиапазона* [4]:

- диапазон низких частот – от 0 до 200...300 Гц;
- диапазон средних частот – от 200...300 Гц до 1...2 кГц;
- диапазон высоких частот – от 1...2 кГц до 10...20 кГц;
- диапазон сверхвысоких частот – от 10...20 кГц до 100...500 кГц.

Полезность такого деления объясняется тем, что каждому диапазону свойственны свои возмущающие силы, своя физическая модель объекта как колебательной упругой системы, своя диагно-

стическая модель и свои методы анализа ВА-сигналов.

Многолетний опыт исследований ВА-сигналов ПК, диагностики и мониторинга состояния ПК [7–10] подтверждает, что ВА-сигналы с достаточной степенью достоверности и адекватности не только характеризуют структурные параметры узлов и деталей ПК, но и адекватно отражают повышенные динамические нагрузки на узлы детали вследствие отклонений физико-химических свойств газа от необходимых для нормальной безаварийной работы ПК.

Методология диагностирования ПК основывается, в том числе, и на анализе ВА-сигнала по углу поворота вала. Анализ уровня ВА-сигнала согласно циклограмме работы клапанов [8] позволяет фиксировать ухудшение работы клапанов, например, вследствие загрязнения и уменьшения проходного сечения, а также возникновение различных неисправностей.

Рассмотрим соответствие изменения давления в полостях нагнетания ПК двухстороннего действия возникновению ВА-сигнала, регистрируемого датчиками, установленными в зоне клапанов.

На рис. 4 (см. 2-ю стр. обложки) представлены сигналы изменения давления в двух полостях нагнетания за один оборот вала и соответствующее возникновение ВА-сигнала. Видно, что за один оборот вала формируется два мощных ВА-импульса. При этом более низкоуровневые импульсы соответствуют открытию всасывающих клапанов. При отказе одного из клапанов, прежде всего нагнетательных, один из ВА-импульсов исчезает (рис. 5, см. 3-ю стр. обложки).

Таким образом, анализ амплитуды ВА-сигнала по углу поворота вала позволяет достоверно определять работоспособность клапанов ПК. При этом изменение амплитуды сигнала, смещение ВА-импульсов по углу поворота вала будут характеризовать изменение режима компримирования в зависимости от физико-химических свойств газа, включая возникновение микрогидроударов, изменение режима работы клапанов и возникновение неисправностей их деталей, правильность подбора параметров клапанов для свойства конкретного газа.

Для диагностирования состояния различных узлов ПК можно использовать и другие методы выделения и анализа ВА-сигнала [8]. Так, анализ вибраций в различных высокочастотных зонах позволил

выявить взаимосвязь амплитуд комбинационных составляющих гармоник частоты вращения коленчатого вала и технического состояния его узлов.

Разработанная система мониторинга состояния ПМ КОМПАКС® [9] и, прежде всего, ПК (рис. 6), обеспечивает безопасную эксплуатацию ПК, опре-

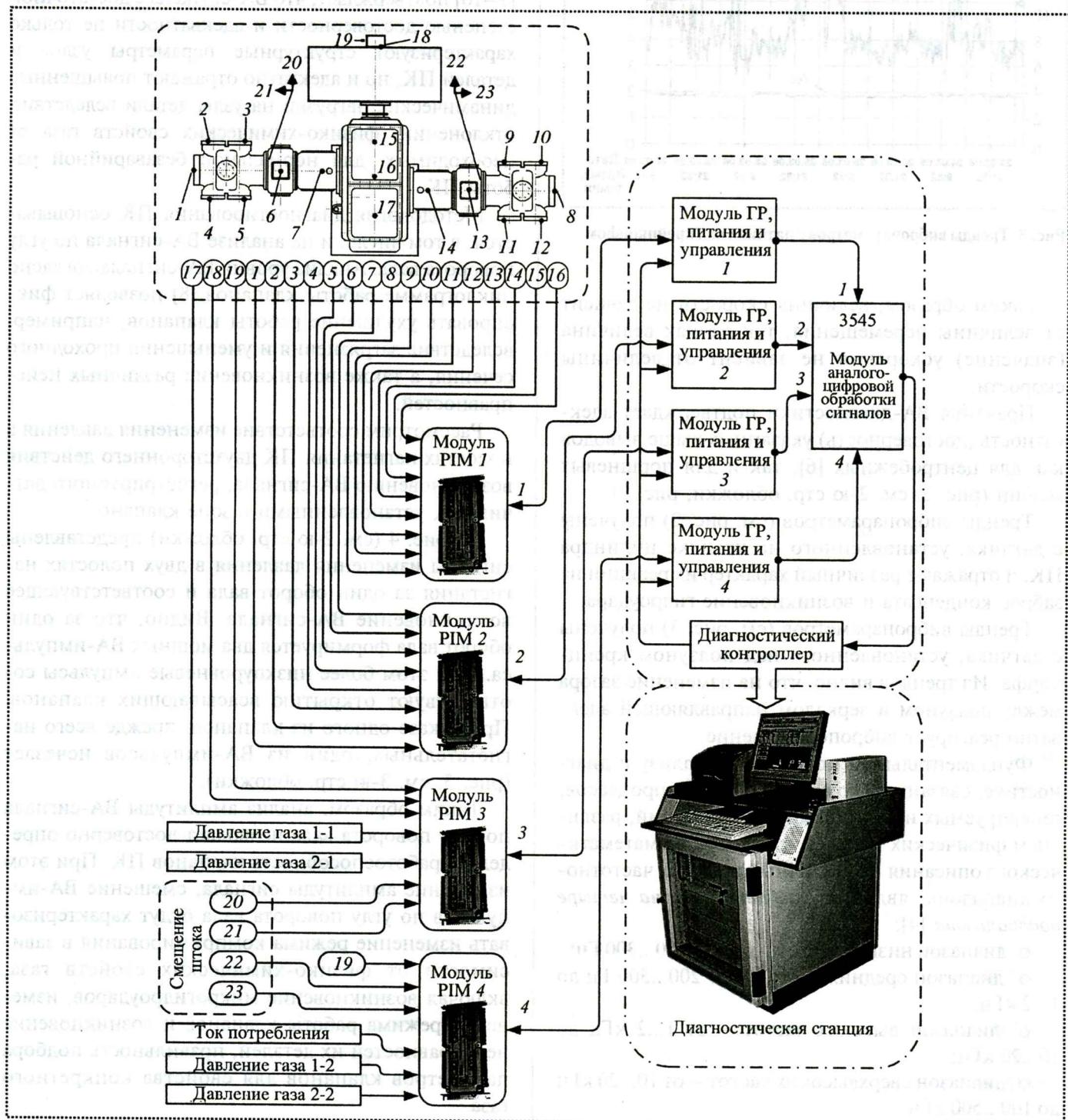


Рис. 6. Структура системы мониторинга поршневых компрессоров КОМПАКС®

1 – 18 – виброакселерометры; 19 – датчик углового положения вала; 20 – 23 – датчики относительного смещения; "Давление газа 1-1, 1-2" – давление газа в первой и второй полостях нагнетания левого цилиндра; "Давление газа 2-1, 2-2" – давление газа в первой и второй полостях нагнетания правого цилиндра



деляет техническое состояние и диагностирует более 20 узлов и неисправностей. При этом система отвечает требованиям, предъявляемым к системам мониторинга состояния оборудования опасных производственных объектов [12].

В основе системы КОМПАКС® лежит многопараметрическая обработка ВА-сигналов, полученных в различных точках ПК, которая наряду с измерением параметров ВА-сигнала для контроля состояния ПК и режимов его работы использует и параметры других физических процессов. При этом особое внимание уделено точкам получения ВА-сигналов, в которых ВА-сигнал наиболее адекватно отражает состояние тех или иных узлов ПК.

Результаты мониторинга состояния оборудования в системе КОМПАКС® выводятся на экран МОНИТОР (рис. 7), на котором отображается символическое обозначение машины (объекта) и узлов (субъектов).

По результатам работы экспертной системы соответствующий субъект окрашивается в зеленый, желтый или красный цвета, что соответствует состояниям диагностируемого узла ДОПУСТИМО для дальнейшей эксплуатации, ТПМ или НДП, при этом курсор на экране автоматически устанавливается на наихудший с точки зрения состояния субъект. При изменении состояния субъекта из

ДОПУСТИМО в ТПМ, из ТПМ в НДП или других изменениях состояния объекта мониторинга система КОМПАКС® выдает речевое сообщение, которое будет регулярно повторяться до момента его квитирования. Кроме этого, на экран выводится текстовое сообщение – результат постановки диагноза.

В начале 2008 г. системы КОМПАКС® осуществляли мониторинг технического состояния более 45 ПК на нефтегазоперерабатывающих заводах в городах Астрахань, Ачинск, Бургас, Волгоград, Омск, Сызрань и др. Под контролем системы эксплуатируются как компрессоры отечественного производства: 4М16М-45/35-55, 4М16М-45/17-37, 2ГМ16-20-42/60, 2М10-11-42/60, 5Г-600-42/60, 205ВП-16/70, 305ВП-16/70 и др., так и импортные: ВДСВ-30/30/20/20x16 (Worthington), 4HF/2 серии HF (Nuovo Pignone), 2TV2 (Neuman & Esser).

В заключение целесообразно рассмотреть несколько примеров адекватной реакции различных вибропараметров на изменение состояний различных узлов ПК.

Тренды вибропараметров системы мониторинга состояния поршневых компрессоров типа 4М16М-35/45-55 (рис. 8, участок 1, см. 3-ю стр. обложки) имеют большое количество выбросов, что свидетельствует о частом повышении уровня вибрации, являющимся следствием появления неисправностей клапанов и разрушения их деталей. Если судить по трендам, то оказывается, что механики непрерывно производили замену клапанов на данном цилиндре, при этом реально максимальное время работы конкретного клапана составляло всего лишь несколько рабочих смен.

Почти пять месяцев клапаны на одном из компрессоров эксплуатировались с заводскими регулировками (см. рис. 8, участок 2). За это время было заменено 17 клапанов. После ревизии и замены пружинок на всех клапанах, регулировки клапанов примерно за четыре месяца до окончания наблюдения уровень вибрации существенно снизился и стал ниже предупредительного.

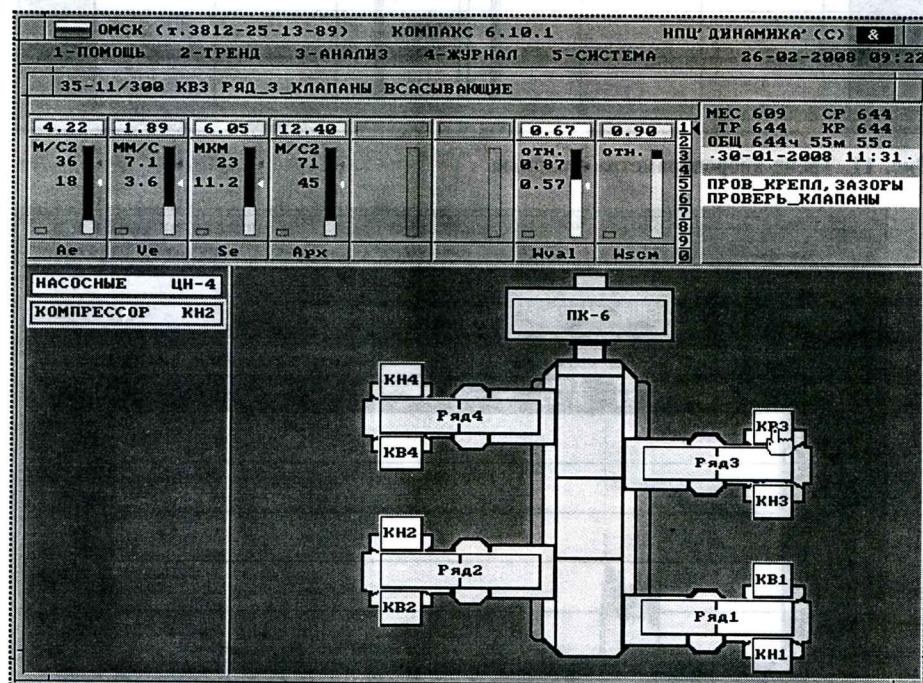


Рис. 7. Экран "МОНИТОР" системы КОМПАКС® отображает состояние ПК

Рис. 9. Тренды вибропараметров клапанов и на крышке цилиндра

Разрушения клапанов прекратились (см. рис. 8, участок 3).

При пуске компрессора (17.07.02 г.) клапаны не имели неисправностей (рис. 9). Однако буквально через пять дней (21.07.02 г.) в результате изменения технологического режима возросла нагрузка на клапан и в течение двух дней клапан разрушился. В связи с отказом клапана уровень вибрации упал и начала расти его температура. Клапан был заменен (23.07.02 г.).

Особенно эффективно отражают изменение состояния клапанов тренды вибропараметров, приведенные на рис. 10 (см. 3-ю стр. обложки) и 11, которые наглядно отображают процесс возникновения и развития неисправностей, а также последствия действий персонала.

Вибропараметры адекватно отреагировали на изменения состояния клапанов (см. рис. 10). После их замены вибросостояние пришло в норму. На рис. 11 видно, что после замены клапанов уровень вибропараметра снизился более чем в четыре раза.

Тренд параметра сигнала (рис. 12) с вибродатчика, установленного над штоком поршня, показывает, что поршневой компрессор был остановлен в состоянии ТПМ с предписанием "Проверь крепление, проверь зазоры". После проведения ремонта — заменены сальниковых уплотнений — состояние данного узла компрессора стало ДОПУСТИМЫМ для дальнейшей эксплуа-

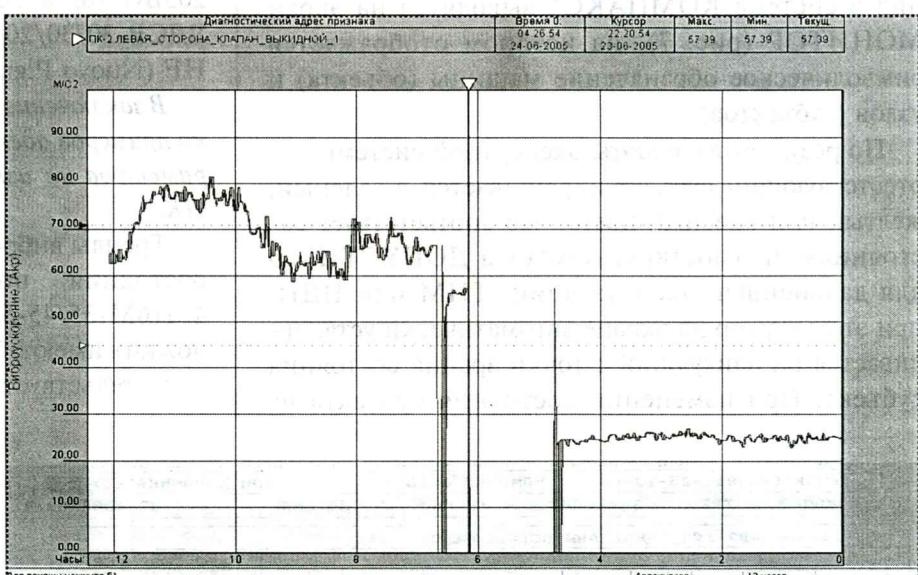
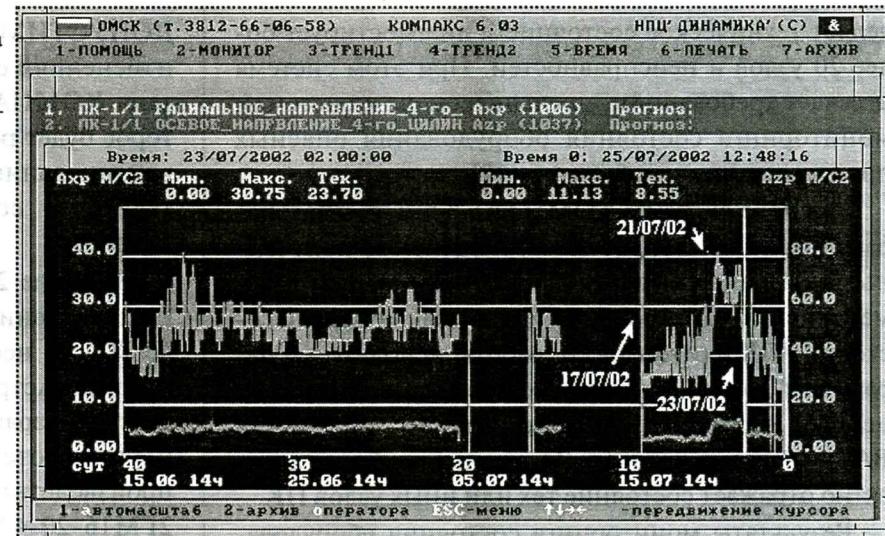


Рис. 11. Тренд вибропараметра клапанов

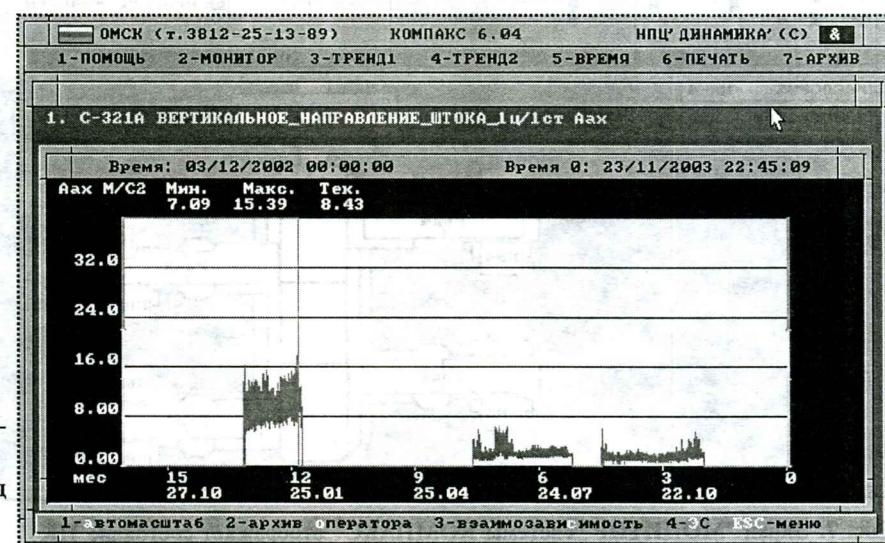


Рис. 12. Тренд вибропараметра с датчика над штоком

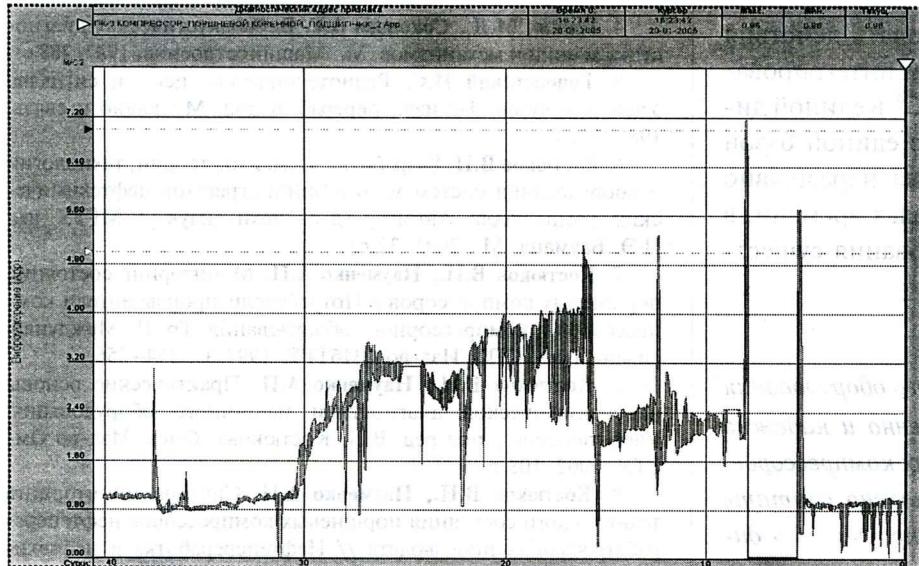


Рис. 13. Тренд вибропараметра с датчика на коренном подшипнике

также неоднократно проводили диагностику. В данном случае видно, что ремонт прошел эффективно и достиг цели.

Мультиmodalный тренд вибропараметра, приведенный на рис. 13, свидетельствует о деградации вкладышей коренного подшипника. Персонал своевременно провел ремонт. В момент пуска после ремонта виден процесс приработки.

На одном из компрессоров типа 4М16М-35/45-55 был отмечен медленный рост уровня вибрации по выброскорости и виброперемещению на втором и четвертом цилиндрах по всем субъектам. Система

выдавала сообщение "Проверь крепление". Механик установки самостоятельно попытался произвести регулировку крепления буферных емкостей. В результате уровень виброперемещения снизился (рис. 14, участок 1), а затем повысился до уровня НДП (см. рис. 14, участок 2). При этом особенно чувствительным к жесткости крепления буферных емкостей оказался датчик, установленный на нагнетательных клапанах второго цилиндра. Затем произведена регулировка натяжений растяжек буферных емкостей (см. рис. 14, участок 3). В результате в какой-то момент времени уровень виброперемещения на нагнетательных

клапанах второго цилиндра снизился ниже уровня ТПМ (см. рис. 14, участок 4). Однако дальнейшие регулировки привели к повышению уровня до значения ТПМ. В результате этих мероприятий уровни виброперемещения и выброскорости на субъектах "цилиндропоршневая группа" и "васывающие клапаны" второго и четвертого цилиндров стали меньше значения ТПМ.

Экспертная система поддержки принятия решений системы КОМПАКС® фиксировала изменение состояния субъектов ПК и информировала персонал речевыми и текстовыми сообщениями о необходимости дальнейших действий, что отражено на трендах вибропараметров, приведенных на рис. 15 (см. 3-ю стр. обложки).

Важнейшим источником сокращения издержек производства является ресурсосберегающая эксплуатация оборудования на основе непрерывного мониторинга его технического состояния в реальном времени, что позволяет:

- предотвращать неожиданные неисправности оборудования и остановки производства;
- непрерывно, в автоматическом режиме получать и использовать объективную информацию о техническом состоянии оборудования;

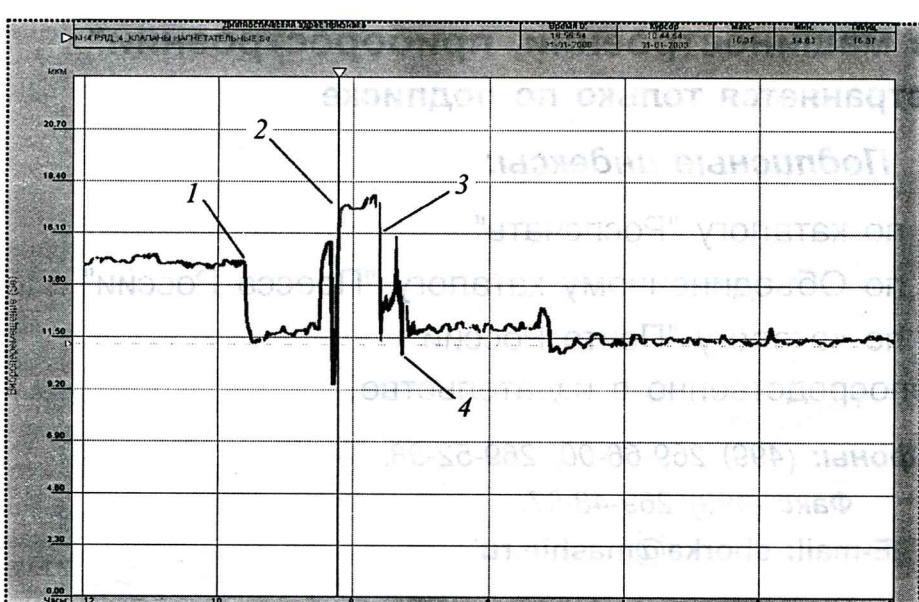


Рис. 14. Тренд вибропараметра клапана



■ контролировать и корректировать действия персонала в реальном времени путем интегрирования информации систем КОМПАКС® в единой диагностической сети Compacks-Net® с единой базой данных параметров мониторинга на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние оборудования существенно не изменяется.

Вывод

Система мониторинга технического оборудования КОМПАКС® позволяет целенаправленно и надежно контролировать состояние поршневых компрессоров. Дальнейшим направлением работ можно считать расширение класса диагностических признаков и диагностируемых состояний компрессоров с учетом их массогабаритных и других показателей или инвариантных им.

Библиографический список

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника". 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 448 с.
2. Бойченко С.Н. Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по спектральным параметрам вибрации: Автореф. ... канд. техн. наук / ОмГТУ, Омск, 2006. 20 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Физматгиз, 1962. 564 с.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
6. Костюков В.Н. Разработка элементов теории, технологии и оборудования систем мониторинга агрегатов нефтехимических комплексов: Автореф. д-ра техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2001. 32 с.
7. Костюков В.Н., Науменко А.П. Мониторинг состояния поршневых компрессоров / Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования: Тр. III Междунар. симпозиума. СПб: Изд-во СПбГТГУ, 1997. С. 254–256.
8. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учеб. пособие / под ред. В.Н. Костюкова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 108 с.
9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2006. №10. С. 38–48.
10. Науменко А.П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. Серия Машиностроение. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 85–95.
11. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
12. Стандарт ассоциации "Ростехэкспертиза", ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ "Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов" общие технические требования (СА 03-002-04). Серия 03/ Колл. авт, М.: Химическая техника, 2005. 42 с., согласованный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 года.

Журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении" распространяется только по подписке

Подписные индексы:

79748 – по каталогу "Роспечать"

84967 – по Объединенному каталогу "Пресса России"

60257 – по каталогу "Почта России"

или непосредственно в издаельстве.

Телефоны: (499) 269-66-00, 269-52-98.

Факс (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

К статье В.Н. Костюкова, А.П. Науменко
“Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин”

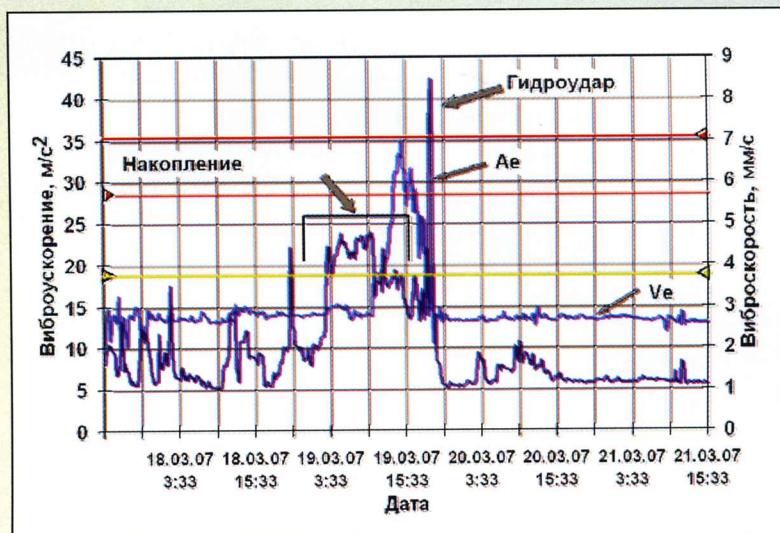


Рис. 2. Тренды вибропараметров с датчика на крышке цилиндра

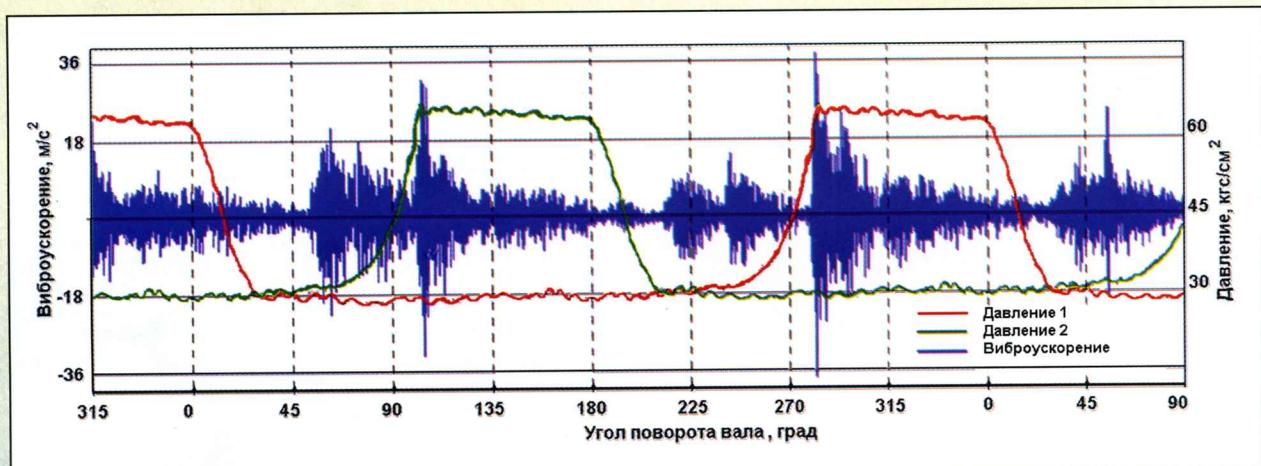


Рис. 4. Вибросигнал и давление в цилиндре при исправных клапанах:
 1 и 2 – давление в первой и второй полостях нагнетателя; 3 – виброускорение

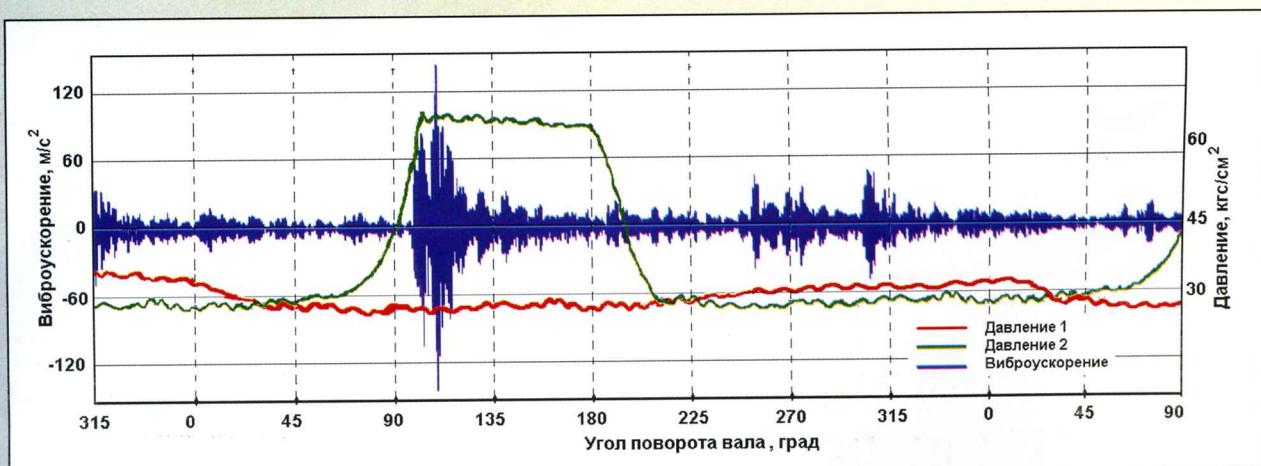


Рис. 5. Вибросигнал и давление в цилиндре при неисправных клапанах:
 1 и 2 – давление в первой и второй полостях нагнетателя; 3 – виброускорение

К статье В.Н. Костюкова, А.П. Науменко
“Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин”

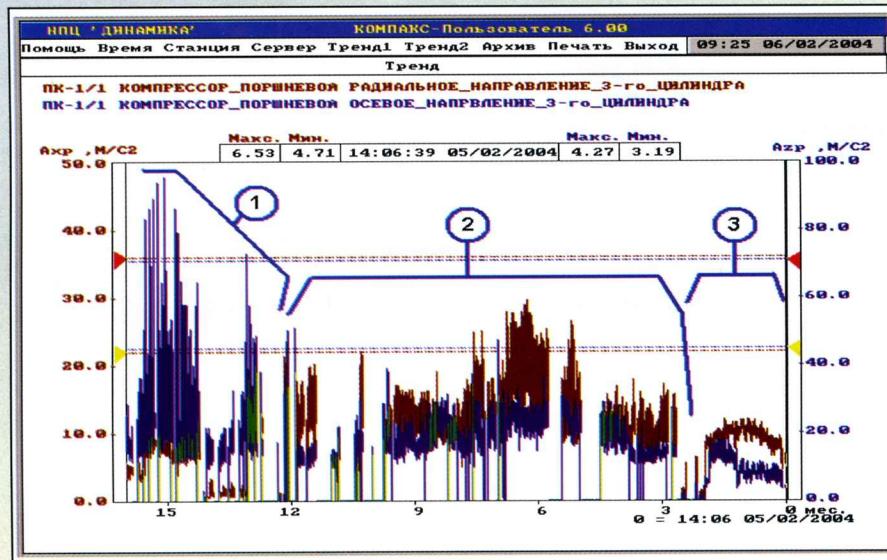


Рис. 8. Тренды вибропараметров клапанов

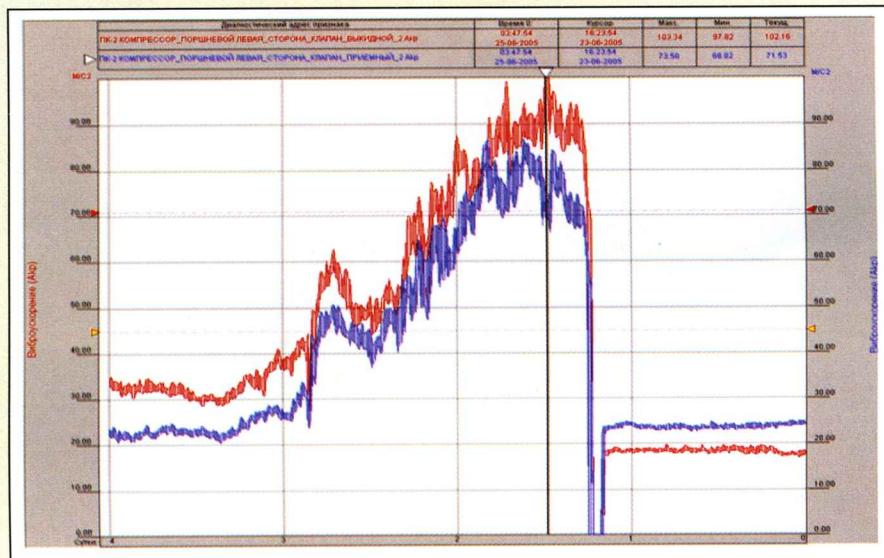


Рис. 10. Тренды вибропараметров клапанов



Рис. 15. Тренды вибропараметров клапанов