



# КОМПЛЕКС ЗАЩИТЫ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ГПА-10 «SIMON»

В. Л. ДОБРОВ, Е. А. ИГУМЕНЦЕВ, Я. С. МАРЧУК

*Комплекс «Simon» — это система защиты и мониторинга оборудования ГПА, основанная на измерении вибрации корпусов подшипников ГПА, дает возможность наиболее просто, дешево и эффективно перейти к новой идеологии в обслуживании — проводить ремонт технологического оборудования не по причине аварии или по графику, а на основании достоверной информации о техническом состоянии агрегата. Воплощая в себе новейшие технические и технологические решения, система «Simon» способна реализовать все известные преимущества принципа обслуживания оборудования «по состоянию» и делает эксплуатацию газоперекачивающего агрегата более рентабельной.*

*«Simon» complex is a system of protection and monitoring of GPU equipment based on measurement of vibration of GPU bearing cases, offers the simplest, most inexpensive and efficient method of transition to a new maintenance ideology of repair of process equipment not in case of accidents or by a schedule, but based on valid information on the technical condition of the unit. Embodying the most advanced engineering and technological solutions, «Simon» system is capable of implementing all the known advantages of the principle of equipment maintenance based on its condition, and improves the cost effectiveness of gas-pumping unit operation.*

**Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** Интенсивное развитие газовой промышленности, сопровождающееся ростом протяженности газопроводных систем и их размещение в труднодоступных районах, предьявляет повышенные требования к надежности газотранспортного оборудования и снижению эксплуатационных затрат. Техническое обслуживание (ТО) газотранспортного оборудования компрессорных станций — это этап эксплуатации, включающий текущую и прогнозируемую оценки технического состояния газоперекачивающего агрегата (ГПА) и организацию на базе этих оценок технических и других мероприятий, направленных на поддержание его эффективности, надежности и готовности. Задача оценки и прогнозирования технического состояния должна быть составной частью ТО, определяющей все последующие мероприятия [1].

Для предотвращения неконтролируемых отказов в процессе эксплуатации газотранспортного оборудования, снижения расходов на ремонтно-восстановительные работы, уменьшения времени и объемов работ применяются различные методы определения оптимальной повторяемости ТО. Существующие методы заключаются в том, что на базе физико-химических свойств материалов и анализа протекающих в каждом типе конструируемого агрегата процессов разрабатывают систему ТО различных уровней от профилактики до капитального ремонта и включают эту систему в паспорт изделия. Усреднение свойств материалов и протекающих процессов на уровне агрегата в целом приводит к тому, что рекомендованная повторяемость ТО не является оптимальной.

Стратегия «эксплуатации по состоянию» [2] позволяет решить указанные проблемы путем оптимизации времени проведения ТО, самой процедуры обслуживания, причем принятие решения о необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ осуществляется по результатам некоторых расчетных показателей, которые адекватно характеризуют техническое состояние ГПА. Текущие и прогнозируемые оценки технического состояния, включающие характеристики износа, старения, дефектов узлов ГПА, рассчитываются на работающем агрегате.

Практическая возможность получения оценок технического состояния позволяет обеспечить: останков агрегата только по необходимости (если результаты оценки требуют этого); замену узлов и деталей только при достижении критической стадии износа; слежение за динамикой изменения технического состояния, позволяющее в принципе исключить возможность аварий любого вида (из числа контролируемых). При этом минимизируются суммарные производственные затраты, а также появляется возможность прогнозировать границу рентабельности ремонтных работ, за которой проведение этих работ становится убыточным.

**Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем.** В настоящее время не существует законченной общей методологии, обеспечивающей адекватную оценку технического состояния газотранспортного оборудования. Опыт проведения диагностических исследований показал, что техническое состояние газоперекачивающего оборудования наиболее полно характеризуется параметрами виброакустического сигнала [3]. Существуют два направления развития методологии вибродиагностического обследования, однако, независимо от применяемого



метода, основные функциональные возможности систем диагностики должны обеспечивать получение текущих оценок износа узлов, изделий и отдельных конструкций; степени развития выявляемых характерных дефектов; остаточного ресурса эксплуатации узлов и всего агрегата в целом.

Централизованное вибродиагностическое обслуживание ГПА силами оперативных бригад [4], требующее использования специальной анализирующей аппаратуры (анализаторов спектра) с применением переносных коллекторов-сборщиков, ориентировано на участие специалистов высокой квалификации. Здесь одной из основных задач является установление оптимальной периодичности виброиспытаний ГПА. В тоже время этот подход не обеспечивает обнаружения быстропротекающего развития дефектов.

**Цель исследований.** Безусловно, самое полное решение задачи оптимизации производственных затрат можно получить только с внедрением автоматических адаптивных систем диагностики с непрерывным контролем в реальном времени, с использованием комплекса автоматизированных систем и каналов связи. Объективной предпосылкой для разработки и внедрения такого решения является внедрение в Укртрансгазе Украины технических средств микропроцессорной техники, обеспечивающих возможность автоматизированного сбора, накопления, передачи и обработки диагностической информации. При такой постановке задачи автоматизированный вибромониторинг составляет систему, включающую контролепригодное ГПА; технические средства измерения параметров вибрации (датчики, преобразователи, каналы связи); технические средства сбора, накопления, передачи и обработки входной диагностической информации; комплекс алгоритмов, программ и баз данных, обеспечивающих функционирование системы.

**Результаты исследований.** Для реализации поставленных задач обслуживания «по состоянию» в УМГ «Киевтрансгаз» была разработана автоматизированная система вибромониторинга газоперекачивающего агрегата ГПА-10 комплекс «Simon» [5]. По сравнению с любыми другими существующими на данный момент системами комплекс «Simon» обладает уникальными возможностями обнаружения дефектов и защиты оборудования. Ее основные возможности заключаются в следующем: соединение в себе функций средств защиты и безопасности с возможностями обнаружения дефектов ГПА на ранних стадиях их развития; возможность использования данных, полученных в автоматическом или ручном режимах; возможность мониторинга состояния оборудования в режиме реального времени. Объем и характер виброизмерений, производимых системой, полностью определяется состоянием и режимом работы ГПА, в чем заключается принцип адаптивной стратегии мониторинга, гарантирующей на протяжении всего времени наблюдения достижения наибольшей чувствительности метода.

Комплекс «Simon» является системой мониторинга оборудования ГПА, решающей две ос-

новные задачи. Во-первых, он выполняет защитную мониторинговую, обеспечивая безопасность, вследствие чего система в состоянии защитить оборудование от внезапных поломок. Во-вторых, предупреждает персонал компрессорной станции об изменении технического состояния ГПА, т. е. система способна обнаружить на очень ранних этапах зарождающийся дефект в контролируемом ГПА, а имеющийся в ней широкий набор диагностических средств позволяет определить природу данного дефекта. Обе указанные функции системы полностью автоматизированы. Тщательно разработанные средства постоянного слежения за состоянием оборудования обеспечивают высокую чувствительность системы, вместе с тем минимизируя вероятность появления ложных тревожных сообщений.

Комплекс «Simon» — это система защиты и мониторинга оборудования ГПА, основанная на измерении вибрации корпусов подшипников ГПА [5]. Она была разработана, чтобы дать возможность газовой промышленности Украины наиболее просто, дешево и эффективно перейти к новой идеологии в обслуживании — проводить ремонт технологического оборудования не по причине аварии или по графику, а на основании достоверной информации о техническом состоянии агрегата. Воплощая в себе новейшие технические и технологические решения, система «Simon» способна реализовать все известные преимущества принципа обслуживания оборудования «по состоянию» и делает эксплуатацию ГПА более рентабельной.

Система обладает такими качествами, как гибкость, мощность, надежность и возможность расширения функций системы. Эти качества стали реальностью благодаря самому широкому применению во всех узлах системы цифровой обработки информации (ЦОИ). Одно и то же приборное обеспечение может быть применено к решению большого числа разнообразных задач.

Различные задачи по мониторингу оборудования могут приводить к различным оптимальным техническим решениям. Аппаратная часть комплекса «Simon» выполнена из независимых модулей, каждый из которых осуществляет преобразование обрабатываемого сигнала по собственному алгоритму. Это означает, что каждый измерительный канал работает индивидуально и независимо от вида контролируемого параметра. Благодаря ЦОИ модули могут оперативно изменять собственную стратегию виброизмерений в соответствии с текущим режимом или состоянием машины. Это обстоятельство предоставляет пользователю в каждом конкретном случае беспрецедентные возможности защиты оборудования, анализа ситуации, развития и гибкости системы, оптимальные с точки зрения поставленных перед ним требований по предупреждению аварий, необходимой глубине диагностики.

Комплекс «Simon» в состоянии реализовать любую известную методику анализа технического состояния оборудования. В качестве примеров можно указать измерения среднеквадратичного значения и пиковых значений, спектральный, порядковый и гармонический анализ. Это достигается за счет

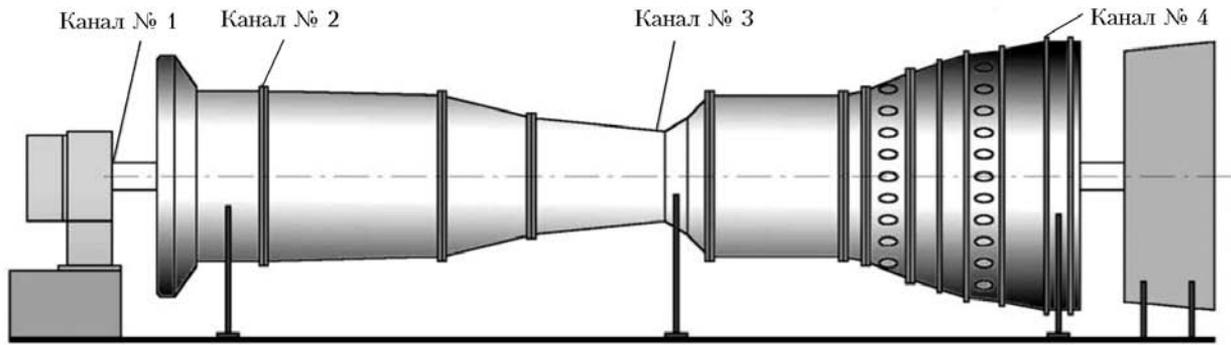


Рис. 1. Места установки датчиков комплекса «Simon» на ГПА-10

отличительных особенностей комплекса, а именно того, что в отличие от всех аналогов вибросигнал поступает от аппаратной в программную часть комплекса не в виде среднеквадратичного значения, а в виде спектра с установленной разрешающей способностью один герц, то есть в виде полной информации о вибрационном состоянии агрегата.

Экспериментальным образом было установлено, что проведение постоянных виброизмерений в четырех основных (критических) точках турбоагрегата достаточно для получения исчерпывающей картины вибросостояния ГПА. На основании этого была переработана методика вибродиагностики ГПА [6] для четырехканального диагностирования. На основании анализа большого парка ГПА были построены опорные маски виброскорости подшипников ГПА для каждого из четырех используемых в системе каналов. Эти опорные маски встроены в программную часть комплекса и на их основе построен алгоритм выявления зарождающихся дефектов газоперекачивающего агрегата в реальном масштабе времени.

Комплекс виброконтроля «Simon» предназначен для непрерывного контроля вибрации промышленных агрегатов. Аппаратная часть комплекса обеспечивает: измерение СКЗ виброскорости; индикацию результатов измерений на дисплее; изменение количества усреднений при измерении; связь с внешним персональным компьютером; задание СКЗ уровней аварийной и предупредительной сигнализации; формирование управляющих сигналов о превышении уровней аварийной и предупредительной сигнализации для системы противоаварийной защиты.

Структурной единицей измерительного комплекса является канал, в состав которого входят:

вибропреобразователь, блок согласования и нормализации (БСН), контрольно-измерительный модуль (КИМ). КИМ собираются в контрольно-измерительном блоке (КИБ) на задней панели которого расположены разъемы для подключения БСН, персонального компьютера, разъем блокировок и разъем питания. В одном КИБ допускается установка до семи КИМ, однако на основании проведенных экспериментальных исследований количество каналов, необходимое для полноценного анализа вибросостояния агрегата, уменьшено до четырех. Места установки датчиков приведены на рис. 1. Датчики размещаются в точках, в которых наиболее четко прослеживаются вибрация основных элементов ГПА: на фланце крышки выносной коробки приводов — канал № 1; на переднем фланце корпуса компрессора низкого давления (КНД) — канал № 2; на заднем фланце корпуса компрессора высокого давления (КВД) — канал № 3; на переднем фланце опорного венца силовой турбины — канал № 4.

В качестве вибропреобразователей применяются выпускаемые ЗАО «Виброприбор» датчики МВ-43-5В. Вибропреобразователь преобразует механические колебания в электрический сигнал (заряд) пропорциональный виброускорению. На рис. 2 представлены структурные элементы канала комплекса «Simon».

БСН усиливает дифференциальный электрический сигнал от вибропреобразователя, фильтрует сигнал в диапазоне 10... 1000 Гц и преобразует его в сигнал переменного тока с амплитудой 4... 20 мА, пропорциональной виброускорению. БСН выполнен из алюминий-кремниевого сплава, внутри размещена печатная плата, на которой собраны усилитель заряда, фильтры, формирова-тель тока и

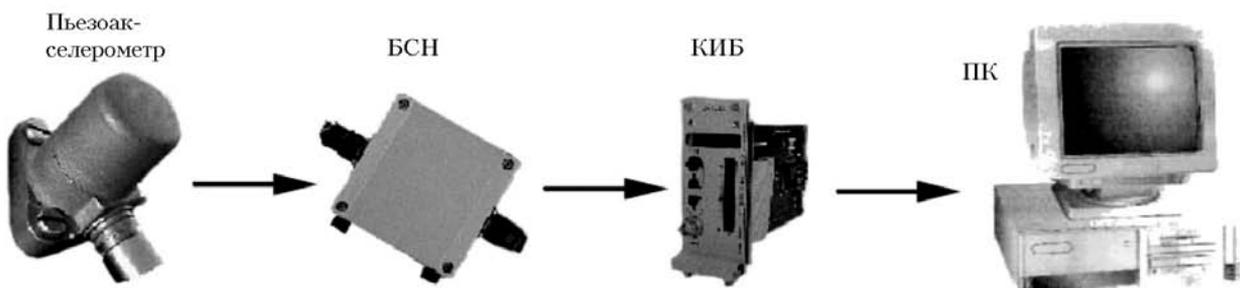


Рис. 2. Структурные элементы канала комплекса «Simon»



узел формирования напряжения отрицательной полярности. Корпус БСН имеет выводы, предназначенные для подключения кабеля вибропреобразователя и линии связи. БСН размещаются на раме агрегата в непосредственной близости от ГПА.

КИМ представляет собой сборку из двух плат (цифровой и аналоговой). Входной сигнал усиливается и поступает на вход аналогового интегратора. Антилизиновый фильтр устраняет влияние высокочастотных шумов. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оцифровывает сигнал и передает его в шину данных, кроме того, это значение также отображается на индикаторе. Для получения среднего спектрального сигнала за определенный промежуток времени над сохраненными спектрами проводится быстрое преобразование Фурье финитной реализации [1]:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) \exp(-j\pi ft) dt, \quad (1)$$

где  $T$  — конечное время финитной реализации;  $j = -1$ . Дискретной аппроксимацией соотношения (1) является выражение

$$X(f, T) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(j^2 \pi f k \Delta t), \quad (2)$$

где  $x_k = x(k\Delta t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta t$  — интервал времени между выборками;  $N$  — число наблюдений  $x_k$ .

Затем вычисляется математическое ожидание финитных реализаций (усреднение). Полученный

таким образом усредненный спектр по запросу программной части комплекса передается в персональный компьютер по интерфейсу RS-422 для последующей индикации и обработки.

Программная часть комплекса управляет работой аппаратной части, а также проводит обработку, индикацию и сохранение полученных результатов. Она поставляется в виде пакета-инсталлятора, который при запуске производит установку на персональный компьютер всех составляющих комплекса, настройку параметров безопасности, настройку автозапуска необходимых компонентов. В стандартной конфигурации пакет включает: программы «Сервер контроллера» и «SimonView»; файлы пустой базы данных; компоненты BDE, необходимые для функционирования базы данных; документацию к комплексу виброконтроля.

Драйвер «Сервер контроллера» является связующим звеном между написанной на языке программирования высокого уровня оболочкой «SimonView» и аппаратной частью комплекса. Его функции заключаются в преобразовании команд управления в машинный формат и передачи их в КИБ, а также в получении ответ аппаратной части, трансляции его в формат протокола обмена и передачи в программу-оболочку «SimonView». Разработанный интерфейс позволяет подключать к «Server\_DM» одну или несколько программ-клиентов одновременно.

Для управления работой аппаратной части программа с заданным пользователем интервалом выдает запросы на передачу среднеквадратических значений (СКЗ) по всему измеряемому диапазону

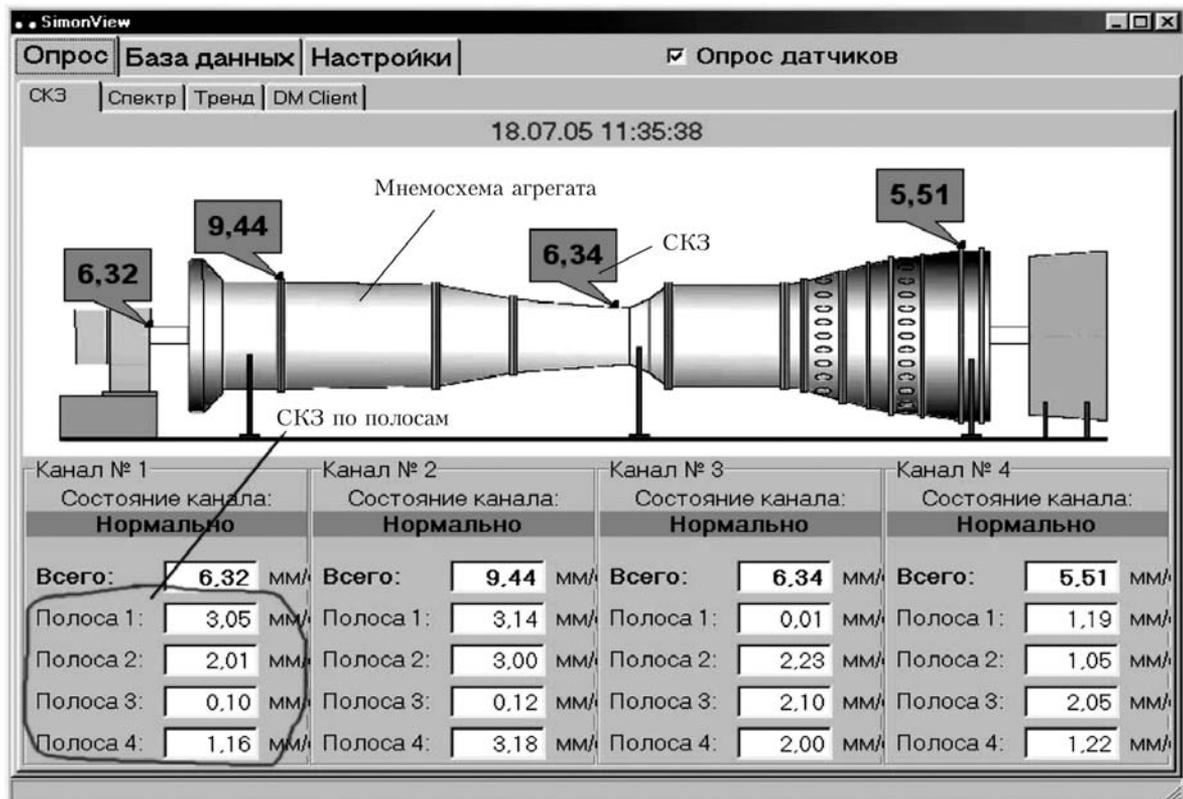


Рис. 3. Индикация СКЗ вибрации на мнемосхеме агрегата

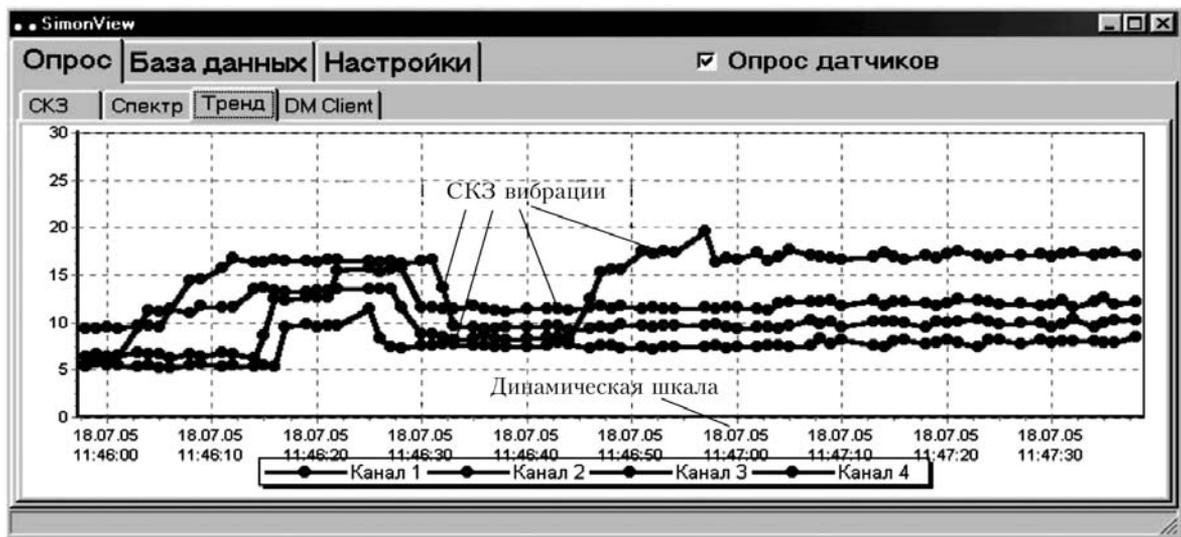


Рис. 4. Построение трендов СКЗ вибрации по всем измерительным каналам

и по установленным полосам, а также запросы на получение спектров. По умолчанию интервал запросов установлен равным одной секунде, причем порядок выдачи запросов следующий: четыре раза запрашиваются СКЗ вибрации по всем четырем каналам (запрос по всем каналам осуществляется одновременно), после чего один раз запрашивается спектр по всем каналам.

Полученная информация проходит несколько этапов обработки. СКЗ используются для индикации мгновенного вибрационного состояния ГПА и формирования трендов, а спектры используются для проведения дефектации агрегата и выявления зарождающихся дефектов. Полученные СКЗ вибрации отображаются на мнемосхеме (рис. 3), где указаны точки крепления датчиков. Кроме того, в этом же окне оператор имеет возможность посмотреть СКЗ вибрации как во всей полосе частот 1... 1000 Гц, так и в четырех заранее установленных полосах частот. Границы указанных полос устанавливаются при настройке КИБ аппаратной части комплекса вибромониторинга.

Кроме этого, оператор имеет возможность строить в режиме реального времени тренд СКЗ по всем четырем измерительным каналам. Построение тренда (рис. 4) начинается при переключении на вкладку «Тренд». При этом на экране отображается график с динамической шкалой, которая автоматически «растягивается» при получении новых данных, причем значения каждого канала отображаются соответствующим цветом. Динамическая шкала времени позволяет зафиксировать изменения для детального изучения построенных трендов за определенный участок, а также возобновить отображение всего тренда, причем при фиксации времени отображения процесс накопления тренда не прерывается.

Прогнозирование ресурса деталей и узлов основано на экстраполяции трендов виброакустического сигнала во времени. Математические модели выбирались на основе физических процессов развития параметров вибрации в период жизни и старения ГПА, ГТУ и ЦБН в виде  $\xi_{ik} = A_{\xi} +$

$+ B_{\xi} \exp(C_{\xi} t)$ ,  $k = 1, \dots, n$ , где  $t$  — время; коэффициенты  $A_{\xi}$ ,  $B_{\xi}$ ,  $C_{\xi}$  — определяются по расчету  $\xi_{ik}(t)$  при  $t = t_j$ ,  $k = 1, \dots, n$ .

Заключительной стадией вибродиагностики является разработка методов определения технического состояния деталей и узлов ГПА, распознавания дефектов и прогнозирования ресурса. Методы исследований основаны на теории распознавания образов. Виброконтроль предаварийного состояния деталей и узлов интерпретируется как распознавание классов технических состояний  $\bar{\xi}_j(\xi_{i,1}, \dots, \xi_{i,n})$ , где  $\xi_{i,k}$  ( $k = 1, \dots, n$ ) — компоненты (признаки) вектора класса  $\bar{\xi}_j$  по совокупности виброакустических характеристик.

Алгоритмы распознавания основаны на сравнении той или иной меры близости распознаваемого состояния  $\bar{\xi}_j(\xi_{i,1}, \dots, \xi_{i,n})$ , где  $k = 1, \dots, n$ , компоненты (признаки) вектора технического состояния  $\bar{\xi}_j$ , с каждым классом. Здесь использовались простое сравнение в определенных частотных диапазонах, двоичновосьмеричные коды и коды чисел Фибоначчи в распределении амплитуд на различных частотных гармониках. Расстояние по Хеммингу и евклидово расстояние используются для специально отобранных дискретных составляющих спектра. Наиболее используемой мерой схожести является скалярное произведение двух векторов или нормированный коэффициент корреляции:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \xi_{ik} \xi_{jk} \left[ \left( \sum_{k=1}^n \xi_{ik}^2 \right) \left( \sum_{k=1}^n \xi_{jk}^2 \right) \right]^{-1/2} \quad (3)$$

При этом представлены модели прогнозирования ресурса ГПА по тренду уровня виброскорости  $V(t)$ . Под прогнозом понимается результат экстраполяции временного ряда вибрации  $V_i(t)$  из прошлого в будущее. Здесь решена задача сглаживания временного ряда, а потом с помощью метода наименьших квадратов получен критерий

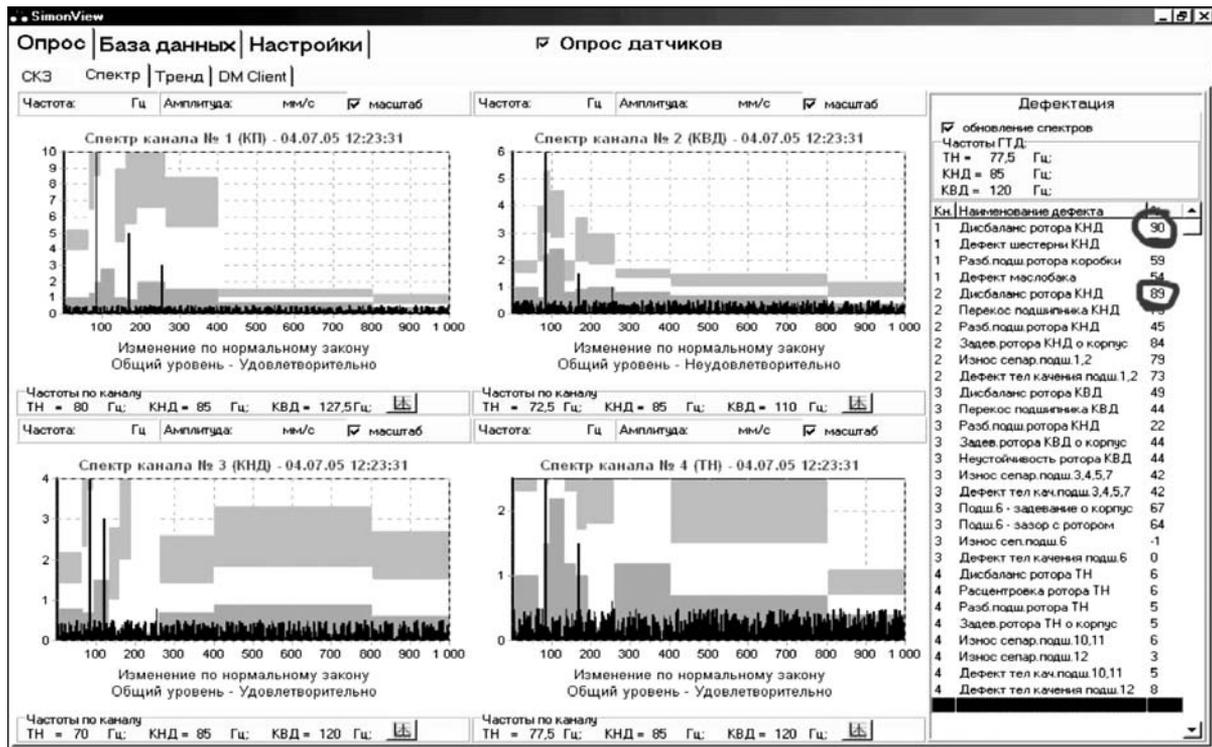


Рис. 5. Вкладка «Спектр» отображения спектров и результатов дефектации

выбора лучшей кривой при прогнозировании в виде коэффициента детерминации  $r^2$ , который является квадратом коэффициента корреляции:

$$r^2 = b^2 \left[ \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2 / n \right] / \left[ \sum_{i=1}^n V_i^2(t) - \left[ \sum_{i=1}^n V_i(t) \right]^2 / n \right], \quad (4)$$

где  $n$  — число расчетных точек предыстории;  $b$  — коэффициент линейной аппроксимации.

Применяются вероятностные оценки разности сравниваемых спектров во всем частотном диапазоне, где строятся гистограммы и вероятностные моменты распределения разности спектров.

Для отображения полученных спектров в программе выделена специальная вкладка «Спектр» (рис. 5). Данная вкладка разделена на две основные части, первая служит для отображения текущих спектров по четырем каналам, а вторая — для отображения результатов дефектации. Раздел отображения спектров представляет собой четыре отдельных окна, расположенных «каскадом». Имеется возможность указателем мыши выделить любую составляющую спектра и посмотреть ее характеристики, т. е. детально изучить любой отображаемый спектр.

Для проведения дефектации агрегата программная часть комплекса (программа «SimonView») содержит разработанные алгоритмы поиска дефектов и предупреждения пользователей об изменении состояния ГПА-10. Алгоритмы разработаны на основании методики вибродиагностики ГПА [6]. На основании проведенного в течение нескольких лет анализа большого парка ГПА разработаны включенные в программу опорными масками вибрационного спектра. Учитывая, что различные ро-

торы (узлы) ГПА возбуждают вибрацию строго на определенных частотах, определяющихся частотой вращения роторов, весь исследуемый диапазон частот (10 Гц... 1 кГц) разбит на десять частотных диапазонов, соответствующих гармоническим составляющим конкретных роторов. Для каждого частотного диапазона определены уровни опорных масок в виде СКЗ виброскорости.

Диапазоны: **10... 65 Гц** включает в себя частоты вращения сепараторов ( $f_c$ ) всех подшипников, субгармоники частоты вращения роторов половинной кратности ( $0,5f_1$ ;  $0,5f_2$ ;  $0,5f_3$ ) и разностную частоту ( $f_3 - f_2$ ); **65... 80 Гц** — частоту вращения ротора силовой турбины ( $f_1$ ); **80... 95 Гц** — частоту вращения ротора компрессора низкого давления (КНД) ( $f_2$ ); **95... 130 Гц** — частоту вращения ротора компрессора высокого давления (КВД) ( $f_3$ ) и комбинационную частоту  $0,5(f_2 + f_3)$ ; **130... 160 Гц** — вторую гармонику частоты ротора СТ ( $2f_1$ ) и субгармонику ротора КНД ( $1,5f_2$ ); **160... 190 Гц** — вторую гармонику частоты ротора КНД ( $2f_2$ ) и субгармонику ротора КВД ( $1,5f_3$ ); **190... 260 Гц** — вторую гармонику частоты ротора КВД ( $2f_3$ ), третью гармонику частоты ротора СТ ( $3f_1$ ), комбинационную частоту ( $f_2 + f_3$ ) и субгармонику ротора КНД ( $2,5f_2$ ); **260... 400 Гц** — третьей гармоники частоты роторов КНД ( $3f_2$ ) и КВД ( $3f_3$ ), субгармонику ротора КВД ( $2,5f_3$ ) и комбинационную частоту  $1,5(f_2 + f_3)$ . Два широкополосных диапазона **400... 800 Гц** и **800... 1000 Гц** используется для диагностики подшипников.

Техническое состояние ГПА-10 определяется соответствующим вибрационным состоянием. В зависимости от интенсивности спектральных составляющих вибрации предусмотрены следующие качественные оценки их вибрационного состояния:

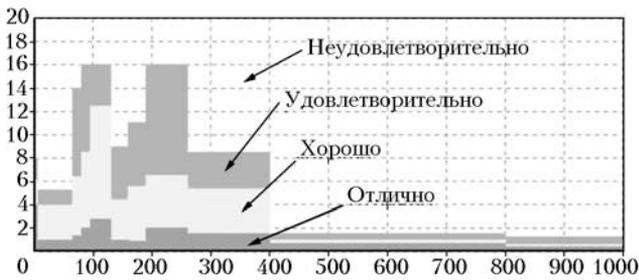


Рис. 6. Опорные маски канала № 1 (коробка приводов)

«отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно». Области «отлично» и «хорошо» предусмотрены для оценки качества ремонта и характеризуют сборку узлов в полном соответствии с техническими условиями, а техническое состояние соответствует эталонному и бездефектному агрегату. Область «удовлетворительно» — эксплуатация ГПА с вибрацией узлов, не превышающей границы «допустимо», характеризуется минимальной вероятностью появления дефектов в период межремонтной эксплуатации агрегата; техническое состояние характеризуется начальной стадией развития дефектов. Область «неудовлетворительно» — эксплуатация ГПА с вибрацией узлов, соответствующей области «требует принятия мер», характеризуется повышенной вероятностью выхода узлов агрегата из строя. На рис. 6 представлены опорные маски по четырем указанным выше уровням для канала № 1 (коробка приводов).

На первом этапе дефектации проводится наложение поступивших в программу спектров по четырем каналам измерения на соответствующие опорные маски. Если полученный при сравнении спектра и опорной маски общий уровень соответствует зонам «отлично» или «хорошо», то последующая обработка исследуемых спектров не проводится и делается заключение о нормальном состоянии узлов агрегата по исследуемому каналу в текущий момент времени.

Так как частоты вращения роторов агрегата (первые и последующие гармоники) расположены в соответствующих областях спектра, но не являются фиксированными (изменяются от режима работы ГПА), то на следующем этапе обработки спектра проводится процедура идентификации трех основных роторных гармоник — частот вращения ТН, КНД и КВД. Вся последующая идентификация строится на основании этих данных. Поиск соответствующих гармоник осуществляется выделением наиболее сильных гармоник в соответствующих областях спектра в точках, где эти гармоники просматриваются лучше всего.

Последующая обработка проводится для каждого канала в отдельности. Для каждого канала построены универсальные маски дефектов в соответствии с методикой [5]. Всего алгоритм дефектации позволяет делать заключение о наличии 29 разнообразных дефектов агрегата. Так, по спектру канала № 1 можно определить наличие таких дефектов: «Дисбаланс ротора КНД», «Дефект шестерни КНД», «Разболтанность подшипника ротора коробки», «Дефект маслобака». По спектру канала № 2 разработанный алгоритм позволяет выявить:

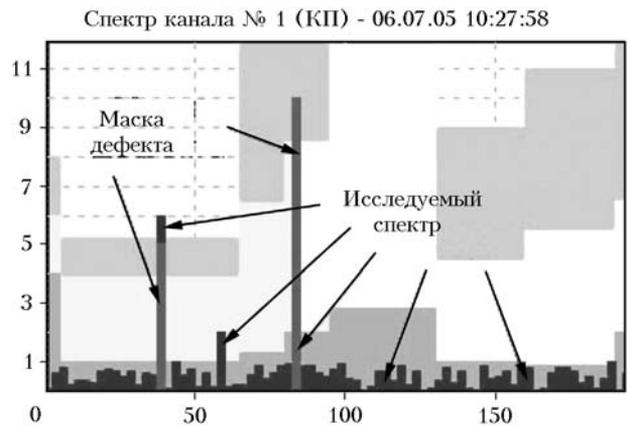


Рис. 7. Наложение маски дефекта на спектр

«Дисбаланс ротора КНД», «Перекас подшипника КНД», «Разболтанность подшипника ротора КНД», «Задевание ротора КНД о корпус», «Износ сепаратора подшипников № 1 и 2», «Дефект тел качения подшипников № 1 и 2». По каналу № 3 можно определить: «Дисбаланс ротора КВД», «Перекас подшипника КВД», «Разболтанность подшипника ротора КНД», «Задевание ротора КВД о корпус», «Неустойчивость ротора КВД», «Износ сепаратора подшипников №№ 3, 4, 5, 7», «Дефект тел качения подшипников №№ 3, 4, 5, 7», «Задевание о корпус подшипника № 6», «Зазор с ротором подшипника № 6», «Износ сепаратора подшипника № 6», «Дефект тел качения подшипника № 6». По спектру канала № 4 алгоритм позволяет делать заключение о наличии таких дефектов: «Дисбаланс ротора ТН», «Расцентровка ротора ТН», «Разболтанность подшипника ротора ТН», «Задевание ротора ТН о корпус», «Износ сепаратора подшипников № 10 и 11», «Износ сепаратора подшипника № 12», «Дефект тел качения подшипников № 10 и 11», «Дефект тел качения подшипника № 12».

Проверка наличия соответствующего дефекта и вычисление вероятности его присутствия проводится следующим образом. Маски дефектов, заложенные в программу, разрабатывались нормированными, т. е. амплитуда максимальной гармоники маски дефекта равняется 1 мм/с. Так, маска дефекта «Дисбаланс ротора КНД» выглядит следующим образом: первая гармоника ротора КНД — 1 мм/с; вторая гармоника ротора КНД — 0,2 мм/с, третья гармоника ротора КНД — 0,1 мм/с. Маска дефекта «Дефект маслобака» выглядит так: первая гармоника ротора КНД — 0,8 мм/с; гармоника 7,45КНД — 1 мм/с. Поэтому перед проведением сравнения со спектром по каждому дефекту соответствующая маска нормировалась в соответствии с амплитудой максимальной гармоники исследуемого спектра.

После проведения нормировки для каждого предполагаемого дефекта вычислялся коэффициент корреляции маски этого дефекта с исследуемым спектром. Полученный в результате коэффициент, умноженный на 100, и представляет собой вероятность наличия дефекта в агрегате.

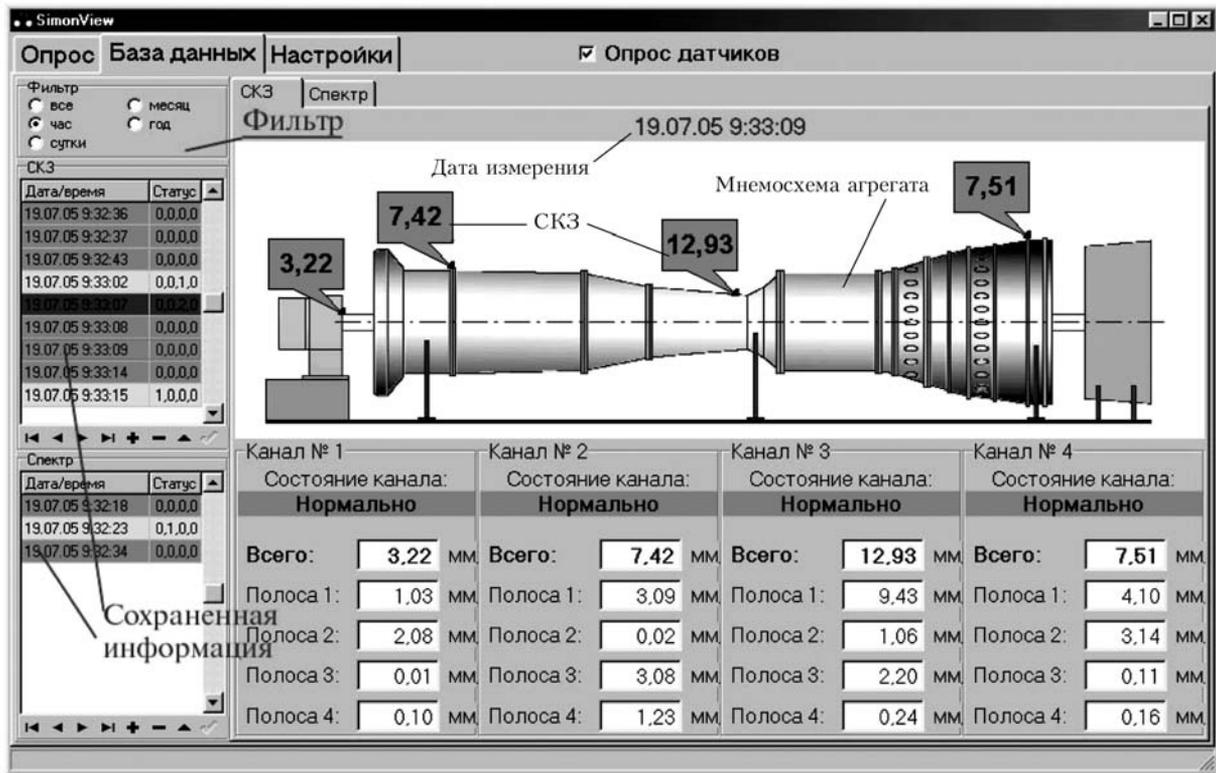


Рис. 8. База данных программно-аппаратного комплекса «Simon»

На рис. 7 представлен пример наложения маски на исследуемый спектр. В данном случае на спектре явно видна первая гармоника ротора КНД с амплитудой 10 мм/с, гармоника 0,485КНД с амплитудой 6 мм/с, а также выброс на частоте 60 Гц с амплитудой 2 мм/с. Наложённая на данный спектр маска дефекта «Дефект шестерни КНД» имеет следующую маску: первая гармоника КНД – 1 мм/с; 0,485КНД – 0,5 мм/с. Сравнение исследуемого спектра с представленной маской даёт коэффициент корреляции 0,88, т. е. с большей долей вероятности можно сделать заключение о наличии соответствующего дефекта в агрегате.

Все операции по запросу данных, обработке и индикации полученной информации, поиску дефектов и сохранению СКЗ вибрации и спектров в базе данных осуществляет программа «SimonView» (рис. 8). Полученная от аппаратной части информация после предварительной обработки и индикации в режиме реального времени поступает для сохранения в модуль «База данных». Так как объём информации, который необходимо сохранить для полноценного ретроспективного виброанализа, достаточно большой, при разработке базы данных было принято решение об использовании специального алгоритма лонгирования. Функционирование этого алгоритма основано на том факте, что при достаточно частых измерениях вибросостояния агрегата виброхарактеристики (спектр вибросигнала и СКЗ вибрации) слабо изменяются и при записи в базу данных всей поступающей информации происходит дублирование информации.

Были введены экспериментально определённые граничные уровни, которые свидетельствуют о зна-

чительном изменении вибрационного состояния агрегата, и в базу данных записывается информация о спектрах и СКЗ вибрации только в критичные (важные) моменты времени. Так, если коэффициент корреляции между ранее сохранённым спектром вибрации по какому-либо каналу и вновь поступившим более 0,8, то это означает, что вибрационное состояние по спектру вибрации данного канала изменилось незначительно. Если по всем каналам в данный момент времени произошли лишь незначительные изменения, то вновь поступивший пакет спектров не сохраняется. Аналогичный алгоритм используется и при сохранении данных по СКЗ вибрации с тем отличием, что в данном случае пределом значимости изменений принимается вибрация размером 1 мм/с.

Приведённый алгоритм лонгирования позволил сократить объём информации, сохраняемой в базе данных, в сотни раз без потери значимых данных. Этот прием позволяет реже проводить архивацию сохранённой информации (в данном случае рекомендуется полное резервное копирование с последующим обнулением базы проводить один раз в год, а без лонгирования – один раз в месяц), улучшает оперативность работы программы за счёт сокращения времени поиска необходимой информации.

Сохранённая в базе данных информация может использоваться для ретроспективного наблюдения за вибрационным техническим состоянием защищаемого агрегата. Есть возможность проводить фильтрацию сохранённых данных, просматривая данные за текущий час, сутки, месяц, год или всю информацию без фильтрации. При выборе определенной записи в таблице сохранённых СКЗ



вибрации автоматически проводится поиск сохраненных спектров, соответствующих выбранному временному диапазону. Таким образом, пользователь имеет полную информацию о состоянии агрегата на выбранный момент времени.

Сохраненные СКЗ виброскорости узлов агрегата и спектров отображаются на вкладках, аналогичных тем, что используются для отображения текущих значений виброскорости в режиме реального времени (см. рис. 8). При этом в полном объеме проводится обработка сохраненных данных, так что при работе с базой данных пользователь имеет возможность ретроспективно просмотреть изменения вибрационного состояния агрегата, провести поиск дефектов на заданный момент времени.

Представленный комплекс прошел опытную эксплуатацию на агрегате ст. № 3 КС «Зеньков» и ст. № 1 КС «Ромненская». Контроль правильности замеров вибрации и работоспособности комплекса осуществляется с помощью переносного коллектора-сборщика фирмы SKF (США) «Микролог» специализированными бригадами. Данные сравнительных испытаний переносной и стационарной систем согласуются между собой.

## Выводы

Внедрение комплекса вибромониторинга и контроля технического состояния ГПА-10 «Simon», включающего технические средства измерения параметров вибрации, сбора, накопления, передачи и обработки входной диагностической информации, а также комплекс алгоритмов, программ и баз данных позволило предложить решение задач оптимизации производственных затрат на техническое обслуживание ГПА и предотвращения неконтролируемых отказов в процессе эксплуатации. Воплощая в себе новейшие технические и технологические решения, система «Simon» способна реализовать все известные преимущества принципа обслуживания оборудования «по состоянию» и делает эксплуатацию ГПА более рентабельной. Областью применения комплекса является контроль интенсивности вибрации: силового оборудования газо- и нефтеперекачивающих станций; энергетических установок тепловых электростанций; коммутационных трубопроводов атомных электростан-

ций; вентиляторов, насосов, компрессоров, трубопроводов и т. п.

Программная часть комплекса характеризуется простым и понятным пользовательским интерфейсом. Вместе с тем, примененные при разработке решения позволяют оператору не только наблюдать мгновенное вибрационное состояние агрегата, но и проводить предварительные исследования на предмет выявления дефектов узлов ГПА. Алгоритм выявления зарождающихся дефектов, реализованный в комплексе, позволяет значительно минимизировать производственные затраты на техническое обслуживание защищаемого агрегата. База данных, входящая в состав комплекса, позволяет проводить ретроспективный анализ вибрационного состояния газоперекачивающих агрегатов и в полном объеме проводить исследование причин отказов оборудования для предотвращения аварийных ситуаций и продления сроков эксплуатации дорогостоящего оборудования компрессорных станций.

1. *Игуменцев Е. А.* Вибрационная диагностика газоперекачивающих агрегатов // Прогрессивные технологии. Машиностроение и современность. — Донецк: ДГТУ, 1997. — С. 110–112.
2. *Игуменцев Е. А.* Стратегия эксплуатации по состоянию и вибрационная диагностика // Машиностроение и техника на рубеже 21 века / Сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. — Донецк, Изд-во ДонГ-ТУ, 2001. — С. 155–160.
3. *Игуменцев Е. А., Марчук Я. С.* Виброакустическая диагностика оборудования дальнего транспорта газа на объектах УМГ «Киевтрансгаз» // Информ. мат. семинара-выставки «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». — Харьков, 2002. — С. 2–4.
4. *Игуменцев Е. А., Прокопенко Е. А., Марчук Я. С.* Оптимизация технического обслуживания газоперекачивающих агрегатов // 36. науч. праць III Наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: Стан і перспективи». — Київ, 2004. — С. 215–216.
5. *Игуменцев Е. А., Прокопенко Е. А., Марчук Я. С.* Автоматизированная система вибродиагностики газоперекачивающих агрегатов ГПА-10 // Мат. Четвертой ежегодной пром. конф. с международным участием «Эффективность реализации научного ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». — Славское, февраль 2004 г.
6. *Игуменцев Е. А., Работягов В. И., Шмидт В. В.* Методика вибродиагностики технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГПА-10 и ГПА-10-01 в условиях эксплуатации на компрессорных станциях газовой промышленности // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 1. — С. 11–20.