

УДК 681.2:004.42

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ДАННЫХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ И СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА



П.Ю. Бранцевич
Докторант БГУИР,
кандидат технических
наук, доцент
branc@bsuir.edu.by

П.Ю. Бранцевич

С 1985 года работал в области разработки архитектуры, методов, алгоритмов и программного обеспечения компьютерных систем и комплексов для определения метрологических характеристик виброизмерительных преобразователей и виброустановок, решения задач вибрационного контроля, мониторинга, диагностики и автоматизации защиты сложных механизмов и агрегатов с вращательным движением. С 1995 по 2019 годы научный руководитель НИЛ «Систем вибродиагностики» БГУИР. Более сорока измерительно-вычислительных комплексов вибрационного контроля и мониторинга внедрены и введены в промышленную эксплуатацию на предприятиях энергетики Беларуси. Являлся научным руководителем и исполнителем четырех заданий Государственной научно-технической программы (ГНТП) «Энергетика», двух заданий ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций», четырех заданий ГПНИ «Диагностика», более ста хозяйственных договоров. Автор трех монографий.

Аннотация. С начала 90-х годов лабораторией систем вибродиагностики начата разработка, внедрение и введение в промышленную эксплуатацию компьютерных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) непрерывного вибрационного контроля, мониторинга и автоматизации защиты сложных механизмов и агрегатов с вращательным движением, а также ИВК для регистрации и обработки длинных временных реализаций вибрационных сигналов. Результатом работы ИВК являются файлы суточных временных трендов для 14 вибрационных параметров с временным шагом 1-8 секунд по каждой точке контроля на эксплуатируемом объекте и файлы вибрационных сигналов. Рассмотрены методы и алгоритмы обработки получаемых больших данных с целью определения информативно-значимых параметров и характеристик для дальнейшего их использования в автоматизированных и автоматических системах принятия решений.

Ключевые слова: вибрация, сигнал, цифровая обработка, параметр, характеристика, решение

Введение. На предприятиях критической инфраструктуры, в энергетике, газотранспортной системе, нефтехимии, транспорте в процессе эксплуатации актуальны и необходимы оценка и прогнозирование технического состояния производственных объектов, своевременное обнаружение и предупреждение развития возникающих дефектов, защита от аварийных ситуаций. Вибрационный контроль, мониторинг, диагностика позволяют получить ответ на многие из этих вопросов [1].

Сложные задачи, возникающие при оценке состояния механизмов и агрегатов, решении задач технической диагностики, требуют соответствующего аппаратного, алгоритмического, программного, метрологического и методического обеспечения. Высокая вычислительная мощность современных малогабаритных компьютеров,

возможность подключения к ним по стандартизованным интерфейсам АЦП и специализированных устройств позволяет создавать на их основе измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), способные решать перечисленные задачи, и обладающие при этом гибкостью, модифицируемостью, возможностью функциональной расширяемости и адаптации под новые задачи условия применения.

Эффективность и круг решаемых задач таких систем в основном определяется возможностями математического и программного обеспечения. Роль последнего еще больше возрастает в связи с необходимостью автоматизации ряда сопутствующих задач, связанных с проведением периодических проверок виброизмерительного оборудования, метрологической аттестации ИВК, обработкой результатов измерений, принятием решений. Компьютерные системы позволяют собирать большой объем информации о состоянии контролируемых объектов.

29 июня 1992 года Белорусское территориальное энергетическое управление «БЕЛОРУСЭНЕРГО» издало указание «О мерах по улучшению вибрационного обслуживания и вибросостояния оборудования электростанций». В нем, в частности, было сказано, что: «виброконтроль работающих агрегатов недостаточно организован и не обеспечен необходимым количеством и качеством штатной и переносной виброизмерительной аппаратуры. Есть случаи несвоевременного выявления диагностических признаков дефектов на ранней стадии развития, не в полном объеме ведется накопление и систематизация данных, характеризующих как весь класс механизмов данного типа, так и существенные индивидуальные отличия».

Возникла острая потребность в современной системе вибрационного контроля и мониторинга для предприятий энергетики Беларуси. В перспективе эта система должна была интегрироваться в станционные АСУ ТП, а также решать задачи оценки технического состояния турбоагрегатов и автоматически принимать решение о защитном отключении.

При этом следовало учитывать ряд существенных требований:

- непрерывная работа с обработкой исходных вибрационных сигналов в режиме реального времени;
- обеспечение требуемых метрологических характеристик в производственных условиях с учетом изменений окружающей среды;
- высокая цена принимаемых решений.

Такая система была создана и в 1994 году прошла первые производственные испытания. В докладе представлены основные научные результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательских, опытных, экспериментальных и внедренческих работ по созданию компьютерных систем и комплексов для решения перечисленных задач.

Компьютерные ИВК. Для решения задач по улучшению вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния турбоагрегатов Белорусской энергосистемы была предложена концепция построения компьютерных ИВК. Компьютер является основным элементом такого ИВК, а его функциональность определяется программным обеспечением, разрабатываемым под конкретные производственные задачи и достаточно просто модифицируемым при изменении или расширении функциональных требований. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые используется универсальный модуль АЦП, подключаемый на стандартную шину компьютера и работающий в режиме реального времени. На входы АЦП могут подключаться выходы любых первичных информационных каналов, которые преобразуют изменения физических величин в электрический сигнал тока или напряжения.

Предложена структура ИВК для работы в режиме реального времени с групповым переключением каналов для многоточечного контроля многоопорного механизма или агрегата. Разработано несколько модификаций ИВК (серия «Лукомль», «Палессе», «Полоцк-2003»). При работе ИВК «Лукомль» для определения параметров вибрационных

сигналов в большинстве случаев используется вибрационный сигнал длиной 200 мс, что соответствует десяти оборотам вала турбоагрегата, вращающегося с частотой 50 Гц. Каждая подшипниковая опора контролируется в трех направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-осевом. Для каждой точки контроля вычисляется 14 параметров вибрации, а для подшипниковой опоры, соответственно, 42. Для турбоагрегата с восемью подшипниковыми опорами каждые 2 секунды вычисляются 336 параметров. Следовательно, для турбоагрегата за час получается 604800 значений параметров вибрации, а за сутки – 14515200, которые сохраняются в файлах на жестком диске компьютера. Таким образом, уже к концу 90-х годов внедрение ИВК «Лукомль» обеспечило получение больших данных [2].

В последствии более тридцати ИВК серии «Лукомль-2001» внедрены на предприятиях энергетики Беларуси и введены в промышленную эксплуатацию[3–8]. Они реализованы на базе универсальных средств вычислительной техники и типизированных устройств ввода информации от первичных виброизмерительных преобразователей и их функциональные возможности во многом определяются программно-алгоритмическими средствами, которые предоставляют возможность пользователю путем установки соответствующих значений настроечных параметров выбрать нужный режим функционирования. На рисунках 1-6 представлены составные элементы этого компьютерного комплекса.

Виброизмерительный канал (рисунок 1) состоит из первичного виброизмерительного преобразователя (ПВИП) и согласующего усилителя. ПВИП является пьезоэлектрическим акселерометром, преобразующим ускорение механических колебаний в электрический заряд с высокоомным выходом. Согласующий усилитель преобразует заряд в электрическое напряжение (ток), которое по длинным соединительным каналам, подается на вход блок аналоговой коммутации виброизмерительных каналов и низкочастотной фильтрации (рисунок 4).



Рисунок 1. Первичный виброизмерительный преобразователь и согласующий усилитель



Рисунок 2. Датчик фазовой метки и согласующий усилитель

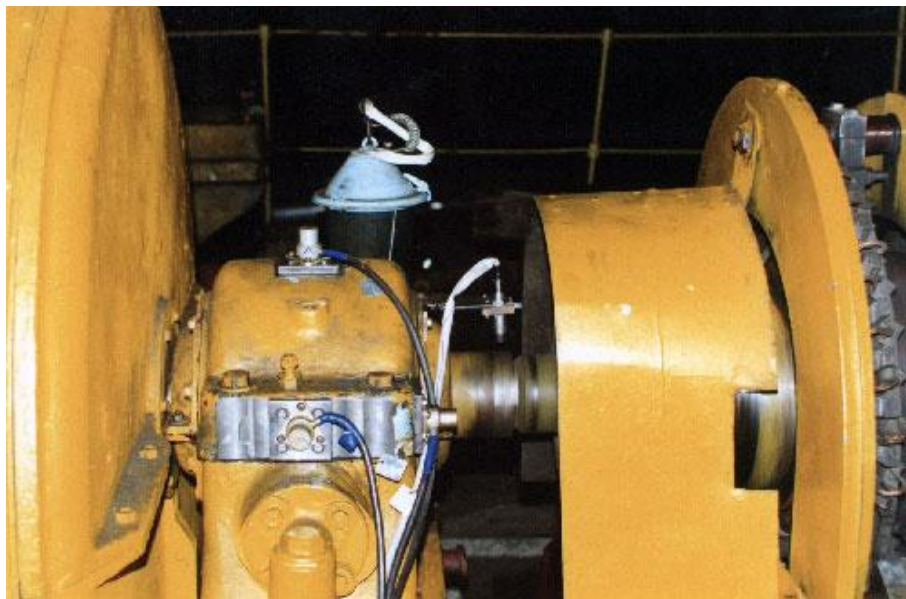


Рисунок 3. Установка ВИП на подшипниковой опоре турбоагрегата для контроля ее механических колебаний и датчика фазовой метки для определения частоты вращения вала

Канал датчика фазовой метки (рисунок 2) представляет собой датчик перемещения, позволяющий зафиксировать метку на вращающемся валу в виде изменения напряжения на его выходе и согласующий усилитель, обеспечивающий передачу этого изменения напряжения по соединительному кабелю на вход блока аналоговой коммутации виброизмерительных каналов и низкочастотной фильтрации.

ПВИП крепятся в трех направлениях вертикальном, осевом, горизонтально-поперечном на каждой подшипниковой опоре турбоагрегата. Датчик фазовой метки крепится в удобном для доступа месте в районе одной из подшипниковых опор (рисунок 3). Для большинства турбоагрегатов число подшипниковых опор

варьируется от пяти до двенадцати. Таким образом, число виброизмерительных каналов в ИВК «Лукомль-2001» может достигать тридцати шести.

В блоке аналоговой коммутации виброизмерительных каналов и низкочастотной фильтрации (рисунок 4) выполняется последовательное переключение групп из трех виброизмерительных каналов аналоговым коммутатором на входы низкочастотных аналоговых фильтров. Отфильтрованные аналоговые вибросигналы и сигнал от датчика фазовой метки параллельно подаются на четыре входа универсального модуля АЦП, который по стандартной шине ISA или PCI взаимодействует с процессором компьютера. Оцифрованные сигналы загружаются в оперативную память компьютера для программной обработки. Таким образом, вся вычислительная функциональность при обработке вибрационных сигналов, а также принятие решений осуществляются компьютером в соответствии с запрограммированными алгоритмами. Это позволяет при постоянной аппаратной конфигурации ИВК быстро модифицировать его функциональные возможности.



Рисунок 4. Блок аналоговой коммутации виброизмерительных каналов и низкочастотной фильтрации

В ходе работы программы вся необходимая информация отображается на экране компьютера (рисунок 5). Текстовые протоколы могут выводиться по требованию оператора на устройство печати или сохраняться в виде файлов на жестком диске.

Данные текущих измерений (временные тренды) записываются в файлы, которые впоследствии могут быть подвергнуты вторичной обработке. Файлы предусматривают возможность совместного использования данных приложениями в многозадачных одномашинных или сетевых многомашинных системах.

Также создается текстовый файл, в который периодически или при возникновении аварийно-идентифицируемой ситуации записывается текущее вибрационное состояние контролируемых опор. По указанию оператора или при возникновении аварийно идентифицируемой ситуации создаются файлы, содержащие исходные временные реализации вибросигналов, представленных в единицах виброускорения. Эти файлы впоследствии анализируются с использованием методов цифровой обработки сигналов.

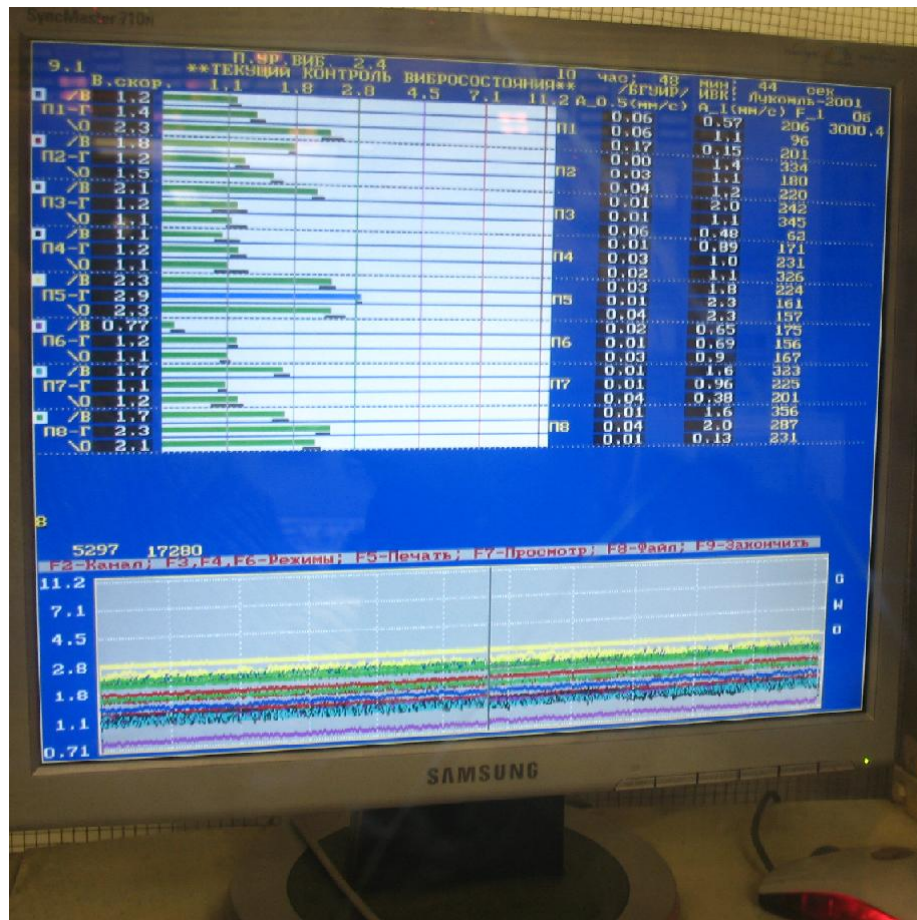


Рисунок 5. Представление результатов вибрационного контроля и мониторинга на экране компьютера

Функциональное программное средство ИВК «Лукомль-2001» обеспечивает реализацию вибрационного контроля и мониторинга подшипниковых опор турбоагрегатов с определением амплитудных и фазовых параметров вибрации в режимах пуска-останова и штатного стационарного виброконтроля с функциями технологической сигнализации и принятия решений о защитном отключении [2, 3, 7].

К компьютеру ИВК по RS интерфейсу подключается блок реле для управления щитовой сигнализацией и защитным отключением турбоагрегата (рисунок 6).

В соответствии с заданными алгоритмами принятия решений о сигнализации и защитном отключении программно формируются управляющие байты, которые передаются в этот блок. Биты этого управляющего байта определяют замыкание (значение бита 1) или размыкание (значение бита 0) контактов соответствующего реле.



Рисунок 6. Блок управления сигнализацией и защитным отключением

Таким образом инициируется выдача сигналов на щит управления о превышении по любому из виброизмерительных каналов, установленных на подшипниковых опорах турбоагрегата:

- СКЗ виброскорости в частотной полосе 10–1000 Гц значений 4,5 мм/с, 7,1 мм/с, 11,2 мм/с;
- СКЗ виброскорости в частотной полосе 10–25 Гц значения 0,5 мм/с;
- скачка вибрации на первой оборотной частоте значения 1,0 мм/с.

Сигнал на защитное отключение выдается в соответствии с заданным алгоритмом принятия решения о возникновении соответствующей ситуации.

В самом простом случае, предусмотренным стандартами [9, 10], сигнал на защитное отключение выдается при превышении по любому из виброизмерительных каналов, установленных на подшипниковых опорах турбоагрегата СКЗ виброскорости в частотной полосе 10–1000 Гц значения 11,2 мм/с.

Более практико-ориентированный алгоритм требует не только превышения СКЗ виброскорости уровня 11,2 мм/с по любому из каналов измерений, но и наличия превышения СКЗ виброскорости по любому из остальных каналов значения 4,5 мм/с.

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и аварийных ситуаций. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного отключения и не допустить «пропуска дефекта». Реализован и прошел апробацию на ряде турбоагрегатов алгоритм защитного отключения по вибрации, в котором учитывается несколько факторов [2, 12, 13].

Если стоит задача создания системы проактивного технического обслуживания оборудования, то возникает потребность тщательного изучения изменений вибрационного состояния технических объектов на разных режимах работы в течение их эксплуатации, обнаружения редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и выявления причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов. Для этого осуществляется регистрация и анализ непрерывных вибрационных сигналов, отражающих состояние объекта, на протяжении длительных временных интервалов (часы и даже сутки).

Для практической реализации данного метода исследований разработан 16-канальный ИВК «Тембр» («Тембр-М» для амплитудно-фазовых измерений) на базе ноутбука, модуля АЦП, виброизмерительных каналов с первичными

виброизмерительными преобразователями и проблемно-ориентированного программного обеспечения [2, 15-17].



Рисунок 7. ИВК «Тембр» для непрерывной регистрации вибрационных сигналов

Измерительно-вычислительный комплекс «Тембр» (рисунок7) содержит следующие функциональные узлы и блоки:

- канал виброизмерительный двухкомпонентный (до 8), состоящий из двухкомпонентного ВИП и согласующих усилителей с полосовой частотной фильтрацией;
- блок ввода цифровых кодов в компьютер (БВЦК) по USB каналу, содержащий 16-и каналный АЦП, аналоговый коммутатор и конвертор питающего напряжения;
- мобильный компьютер типа *Note-Book*;
- соединительные кабели ВИК с БВЦК (до 50 метров).

Для обеспечения метрологических характеристик производится калибровка виброизмерительных каналов с целью определения их коэффициентов преобразования в единицах измерения $mB \cdot c^2/m$.

Основными функциями комплекса являются:

- ввод цифровых сигналов, отражающих вибрационные колебания конструкции при импульсном возбуждении или колебания подшипниковых опор и корпусов механизмов с возвратно-поступательным или вращательным движением;
- запись принятой реализации цифрового вибрационного сигнала в файл(ы);
- оперативное определение основных параметров вибросигнала;
- представление вибрационного сигнала в графическом виде в виде временной реализации или амплитудного спектра.

Для исследования амплитудно-фазовых параметров вибрации механизмов роторного типа ИВК «Тембр» модифицирован («Тембр-М»), в результате чего обеспечена возможность параллельного ввода в компьютер вибрационных сигналов и сигнала от датчика фазовой метки. Пример использования ИВК «Тембр-М» показан на рисунке 8.

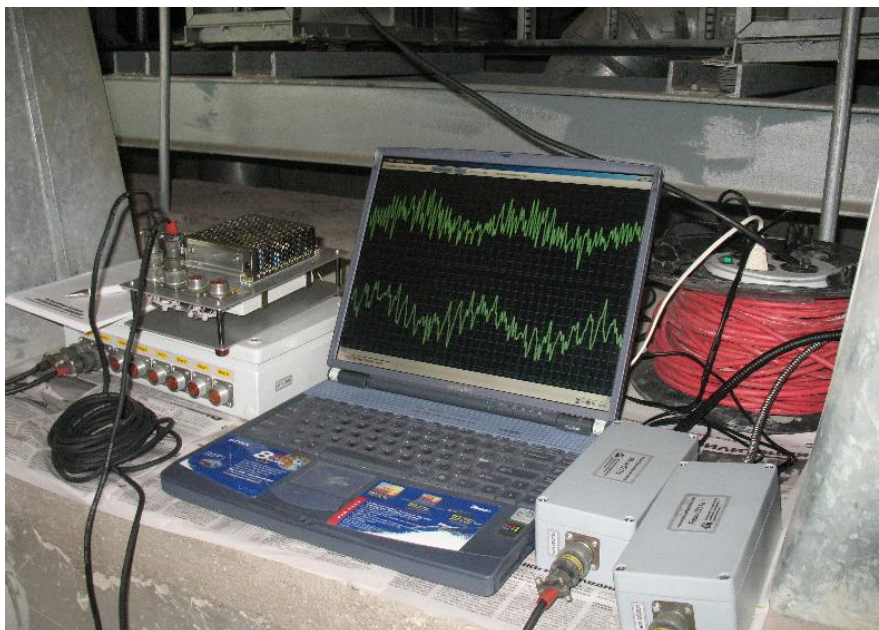


Рисунок 8. Регистрация вибрационных сигналов при анализе вибрационного состояния вентиляционной системы

Временные тренды параметров вибрации. Данные об изменении вибрационного состояния контролируемых подшипниковых опор, получаемые ИВК «Лукомль», записываются в файлы данных. Файлы состоят из записей, каждая из которых представляет собой специальную структуру [4–7].

Для упрощения анализа эти данные представляются в виде графиков [2]. На рисунках 9, 10 показаны примеры графического отображения изменений во времени (трендов) параметров вибрации. Так как одновременное отображение большого количества параметров приводит к ухудшению их восприятия, то предлагаются следующие варианты построения графиков:

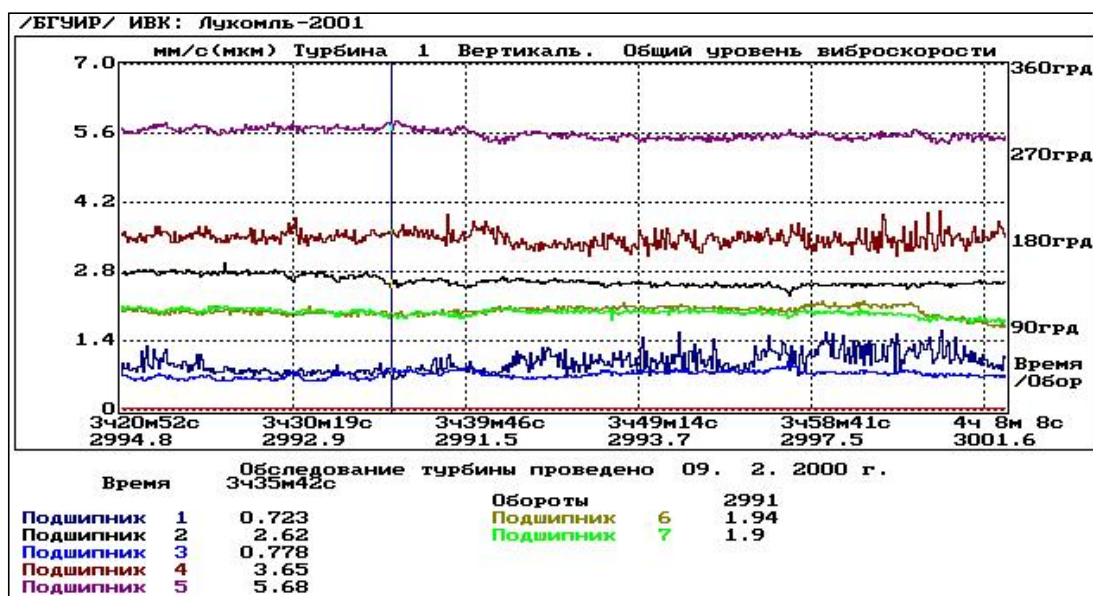


Рисунок 9. Временной тренд СКЗ виброскорости для вертикального направления подшипниковых опор турбоагрегата

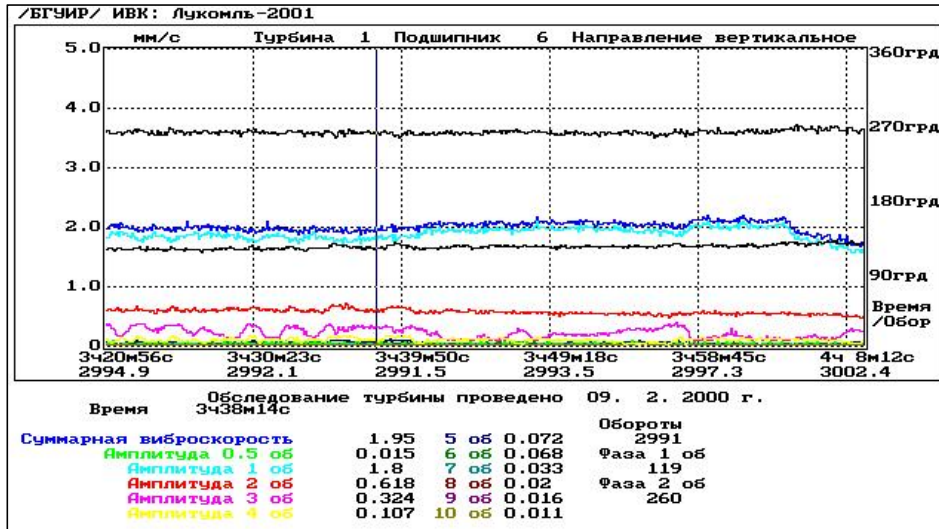


Рисунок 10. Временной тренд СКЗ виброскорости и оборотных составляющих вибрации для вертикального направления одной подшипниковой опоры турбоагрегата

- отображение значений одного из параметров вибрации для всех контролируемых подшипниковых опор (или, по выбору, некоторых из них) одного направления (например, общий уровень СКЗ для горизонтального-поперечного направления, СКЗ первой оборотной составляющей вертикального направления и т.п.);
- отображение всех вычисленных параметров вибрации (или, по выбору, некоторых из них) для одной точки контроля;
- отображение значений одного из параметров вибрации для всех направлений (или некоторых из них) одной из подшипниковых опор.

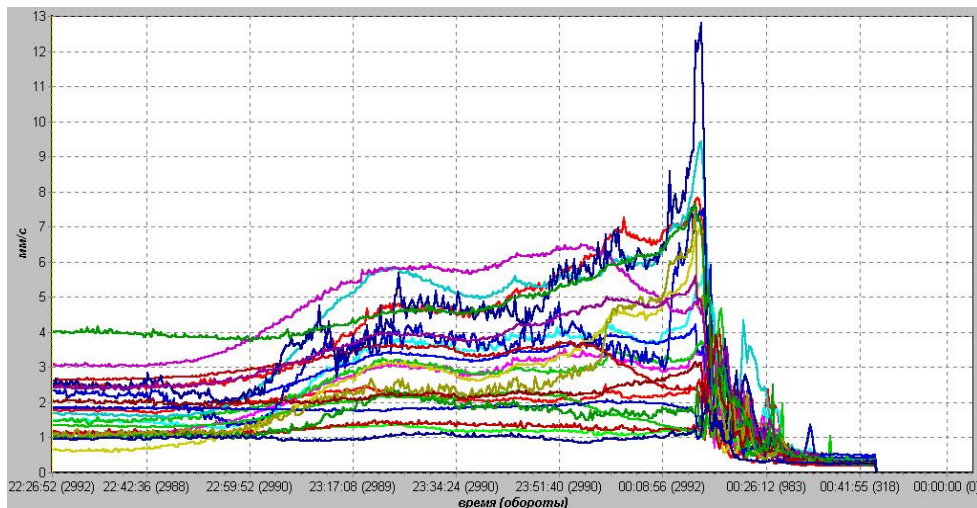


Рисунок 11. Изменение СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 250 МВт, приведших к его аварийной остановке

Однако значения параметров вибрации, которые записаны в файлах, имеют некоторый случайный разброс, который может обуславливаться как особенностями реального вибрационного процесса, так и примененным методом вычисления. Представление функций со значительной случайной составляющей неудобно для общего анализа тенденций изменения параметров вибрации во времени. Для устранения такого эффекта можно применить сглаживание функций [2].

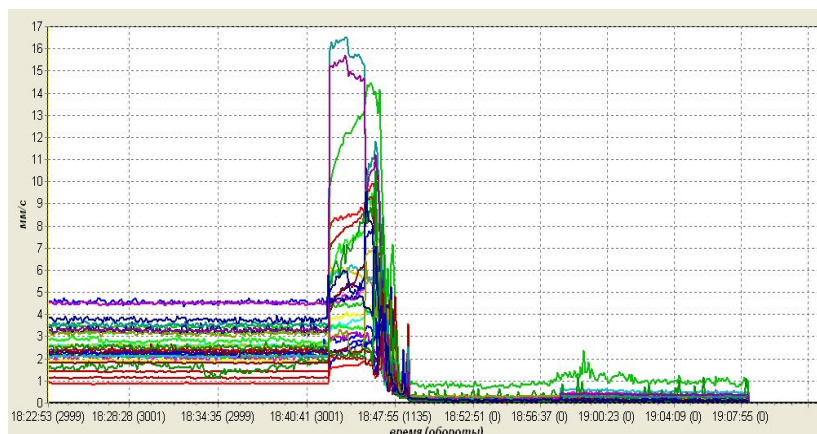


Рисунок 12. Изменение СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 310 МВт при обрыве лопатки

За тридцатилетний период эксплуатации ИВК «Лукомль» было зафиксировано несколько аварийно-опасных ситуаций, когда интенсивность вибрации подшипниковых опор турбоагрегата превышала допустимые уровни и требовалась его остановка. На рисунках 11, 12 представлены изменения СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата при возникновении таких ситуаций [18, 19].

При решении задач технической диагностики производственного оборудования требуется определять и анализировать различные параметры и характеристики. Для механизмов и агрегатов с вращательным движением, к одним из таких, относятся вибрационные характеристики пусков-выбегов. Они представляют зависимость изменения размаха виброперемещения в точке контроля от частоты вращения вала и могут быть получены с помощью современных систем виброконтроля и программ обработки вибросигналов [10–13].

Вибрационные характеристики выбега получают при свободном торможении вращающегося вала во время остановки механизма, а пуска - при его запуске и наборе оборотов. Чаще всего их используют при оценке технического состояния механизмов и агрегатов с подшипниками скольжения (турбоагрегаты, мощные насосы и двигатели). Эти характеристики интересны тем, что во время переходного процесса, связанного с изменением частоты вращения вала, происходит вибрационное возбуждение элементов вращения и опор на собственных частотах, и параметры оборотных составляющих вибрации, вычисляемые в этих состояниях, позволяют оценить величину дисбалансов валопровода и выявить ряд других дефектов [19].

Форма вибрационных характеристик выбега весьма разнообразна, причем существенные отличия наблюдаются даже для одноименных подшипников разных однотипных механизмов. На рисунке 13 представлен пример таких характеристик.

Однако для переходных вибрационных характеристик можно выделить и некоторые закономерности, например, наличие максимумов (глобального и локального), которые по форме напоминают параболу, а также плавность изменения характеристик в какой-то частотной зоне [19].

Осуществляя сравнение самих вибрационных характеристик пусков-выбегов, полученных на протяжении некоторого, достаточно протяженного, интервала времени, можно делать выводы об изменении технического состояния механизма или агрегата [19]. Применение методов формализации принятия решений позволяет автоматизировать реализацию сравнительных процедур [19].

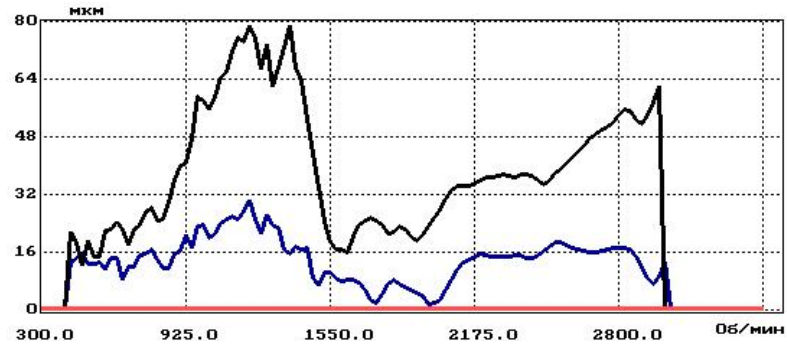


Рисунок 13. Вибрационные характеристики выбега для подшипниковой опоры турбоагрегата, полученные в разное время. Ось абсцисс – частота вращения вала, мин^{-1} ; ось ординат – размах виброперемещения, мкм

Для специалистов в области вибрации интерес представляет изменение переходных вибрационных характеристик, полученных для одного и того же подшипника в разное время, так как их причиной может быть, например, смещение в частотной области значений собственных частот, или изменение величины дисбаланса ротора, или какие-то другие причины.

Заключение. Разработаны концептуальные основы современного научного направления «Компьютерные системы и измерительно-вычислительные комплексы цифровой обработки вибрационных сигналов». Предложены структуры ИВК на базе типовых элементов компьютерной техники. Функциональность таких ИВК определяется разработанным прикладным программным обеспечением. Данный подход снижает затраты на производство, модификацию и эксплуатацию комплексов. Обеспечивается многофункциональность и быстрая настройка под тип контролируемого оборудования. Принимаются, обрабатываются и сохраняются большие объёмы вычисленных параметров вибрационных сигналов и информативно-значимые исходные вибрационные сигналы, что стало одним из направлений концепции больших данных [18,19].

Список литературы

- [1] Неразрушающий контроль: Справочник: В 7.т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова [и др.]. Вибродиагностика, – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
- [2] Бранцевич П.Ю. Компьютерные системы и комплексы обработки вибрационных сигналов – Минск: Бестпринт, 2023. – 282 с.
- [3] Бранцевич П.Ю. ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля. Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69). – С. 19–21.
- [4] Бранцевич П.Ю. Разработать алгоритмические методы определения фазовых параметров вибраций роторных агрегатов. – Мн., БГУИР, 1998. – 530 с. – Деп. в БелИСА 30.10.1998, № Д199867.
- [5] Бранцевич П.Ю. Измерительно-вычислительный комплекс "Лукомль-2001". Программа вибрационного контроля. Описание программы. 375.ГЛЮИ. 00001-01 13 01 ЛУ. – Минск: БГУИР-БЭРН, 1998. – 29 с.
- [6] Бранцевич П.Ю. Измерительно-вычислительный комплекс "Лукомль-2001". Программа вибрационного контроля с определением амплитудных и фазовых параметров вибрации. Описание программы. 375.ГЛЮИ. 00002-01 13 01 ЛУ. – Минск: БГУИР-БЭРН, 1998. – 60 с.
- [7] Бранцевич П.Ю. Разработать и внедрить комплекс программно – алгоритмических средств непрерывного вибрационного мониторинга опор роторных агрегатов электростанций на базовом образце. – Мн.: БГУИР, Деп. в БелИСА 9.03.1999 г., № Д199920, 92 с.
- [8] Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Соболев Г.Г. Организация и алгоритмы системы вибрационного контроля и оценки технического состояния турбоагрегатов по вибрационным параметрам. Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докладов. – М.: ВТИ. – 2003. – С. 25–29.
- [9] Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования: ГОСТ ИСО 10816–1–97. – Введ. 1999–07–01. – Минск.

Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2007. – 18 с.

[10] Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 25364–97. – Введ. 1999–07–01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2011. – 12 с.

[11] Brancevich P. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20-th International Congress on Sound and Vibration 2013 (ICSV 20). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2014. – Vol. 1. – P. 612–619.

[12] Brancevich P.Y. Implementation of Decision-Making Systems Based on a Typical Decisive Element / P.Y. Brancevich // Doklady BGUIR. – 2023. – Vol. 21, – № 5. – С. 96–103

[13] Бранцевич П.Ю., Гузов В.А., Ероховец И.Е., Костюк С.Ф. Алгоритмы защиты по вибрации для детандер-генераторного агрегата. Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл.; под общ. ред. А.В. Салимона. – Москва: ОАО «ВТИ», 2005. – С. 122–124.

[14] Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. Мониторинг вибрационного состояния сложных технических объектов. Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 4-й междунаrodn. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 236 – 238.

[15] Бранцевич П.Ю. Методика применения измерительно-вычислительного комплекса "Тембр-М" при оценке вибрационного состояния механизмов и агрегатов. Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2014. – № 4. – С. 55–67.

[16] Бранцевич П.Ю., Бобрук Е.В., Костюк С.Ф., Степанчук Н.В. Решение задач вибрационного контроля и диагностики механизмов и конструкций с использованием ИВК «Лукомль» и «Тембр». Приборостроение–2010. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 36–38.

[17] Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Бобрук Е.В. Компьютерный анализ собственных частот и вибраций строительных конструкций. Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник докладов VI Международной научно-практической конференции. Ред. кол.: Ю.С. Иванов [и др.]. – Минск, 2011. – С. 166–172.

[18] Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с.

[19] Бранцевич, П.Ю. Оценка технического состояния механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / П.Ю. Бранцевич. – Минск: Четыре четверти, 2021. – 236 с.

Авторский вклад

Бранцевич Петр Юльевич – цифровая обработка сигналов и данных в измерительно-вычислительных комплексах, формирование статьи.

DIGITAL SIGNAL AND DATA PROCESSING IN MEASURING AND COMPUTING COMPLEXES AND VIBRATION CONTROL AND MONITORING SYSTEMS

P.J. Brancevich

Grand PhD courses of BSUIR,

PhD of Technical Sciences,

Associate Professor

Abstract. Since the beginning of the 90s, the laboratory of vibration diagnostic systems began the development, implementation and introduction into industrial operation of computer measuring and computing complexes (MCS) for continuous vibration control, monitoring and automatic protection of complex mechanisms and units with rotational motion, as well as MCS for recording and processing long temporary implementations of vibration signals. The result of the MCS is files of daily time trends for 14 vibration parameters with a time step of 1-8 seconds for each control point at the operating facility and files of vibration signals. Methods and algorithms for processing the received big data are considered in order to determine informationally significant parameters and characteristics for their further use in automated and automatic decision-making systems.

Keywords: signal, vibration, digital processing, parameter, characteristic, solution