



УДК 621

А. А. Владимирский, канд. техн. наук
Ин-т проблем моделирования в энергетике
им. Г.Е.Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел.: (044) 4249170. E-mail: alex@alevla.kiev.ua),

И. А. Владимирский, канд. техн. наук
«Энергоналадка Киевэнерго» АК «Киевэнерго»
(Украина, 02660, Киев, ул. Червоногвардейская, 20а,
тел.: (044) 2394580, E-mail: igor@alevla.kiev.ua).

Разработка средств технической диагностики

Представлены разработанные методы, аппаратные и программные средства контроля и диагностики энергетического и энергоемкого оборудования.

Представлено розроблені методи, апаратні та програмні засоби контролю і діагностики енергетичного й енергоємного устаткування.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергетическое оборудование, тепловой мониторинг, вибродиагностика, параметры движения, метрология.

При решении конкретной задачи технической диагностики, периодического контроля энергетического оборудования и других сложных технических объектов перед разработчиком встает вопрос выбора технической базы для аппаратно-программной реализации проекта. Следует учесть, что большинство эксплуатирующих организаций не имеет средств для полномасштабного выполнения исследовательских работ и налаживания производства спецоборудования. Возникают проблемы с загрузкой даже мелкосерийного производства. Поэтому удешевление разработки и изготовления диагностических средств является весьма актуальной задачей. При этом ужесточаются требования к срокам разработок.

Накопленный опыт построения аппаратно-программных комплексов для диагностики энергонасыщенного оборудования подтверждает целесообразность построения их на базе мобильных компьютеров и минимального объема специального оборудования для связи с диагностируемым объектом. Основные усилия при этом сосредоточены на разработке алгоритмического и программного обеспечения. Были проведены работы в следующих областях: диагностика электрических машин и трубопроводов; контроль параметров движения; теплотрический мониторинг; метрологическое обеспечение.

Диагностика электромашин. Выявление витковых замыканий.

Выполнен ряд исследований, направленных на создание средств диагностики технического состояния турбогенераторов и мощных двигателей.

По известной методике на расстоянии 10 — 12 мм от поверхности ротора устанавливается электромагнитный датчик (рис.1). Поток рассеяния по коронкам зубцов определяется магнитодвижущей силой (МДС) паза. Замыкание витков в пазу ротора турбогенератора приводит к уменьшению МДС. При вращении ротора все пазы непрерывно меняют свое положение. Критерием появления замыкания в витках обмотки возбуждения является уменьшение амплитуды ЭДС.

Величины зубцовых ЭДС существенно изменяются при различных режимах работы генератора. Известно, что более устойчивым критерием появления короткого замыкания (КЗ) в обмотке ротора является не абсолютная величина провала амплитуды ЭДС над соответствующим зубцом, а разница амплитуд ЭДС соответствующих витков у различных полюсов. При этом вероятность одновременного замыкания в двух одноименных пазах очень невелика.

На основе этого метода разработан программно-технический комплекс (ПТК) КЗ-3 [1], позволяющий автоматизировать определение витков с КЗ. В состав комплекса входят блок согласования с датчиками и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), портативный компьютер и программное обеспечение «Контроль межвитковых замыканий турбогенераторов». К числу его функциональных возможностей относятся режим отображения осциллограмм и автоматического измерения витковых напряжений для всех пазов, цифровая фильтрация для подавления высокочастотных помех, поддержка базы данных по всему перечню обслуживаемых турбогенераторов и др.

В настоящее время ПТК КЗ-3 применяется на киевских ТЭЦ для периодического контроля генераторов ТВФ-120-2 и ТВВ-320-2.

Анализ спектров вибраций. Аппаратно-программный комплекс (АПК) «Вибро-3» [2] и соответствующая методика измерения спектров вибросигналов повышенного разрешения созданы для диагностирования технического состояния электродвигателей. Комплекс позволяет проводить запись виброускорений двух точек диагностируемого объекта одновременно. Предусмотрено два режима расчета спектров виброускорения и виброскорости: с разрешением 0,005 Гц в диапазоне 10 — 300 Гц и с разрешением 1 Гц в диапазоне 25 — 10 000 Гц.

В состав комплекса входят два вибродатчика со встроенными акселерометрами КД-35 и предварительными усилителями, двухканальный блок регулируемых усилителей с аналоговыми фильтрами и мобильный

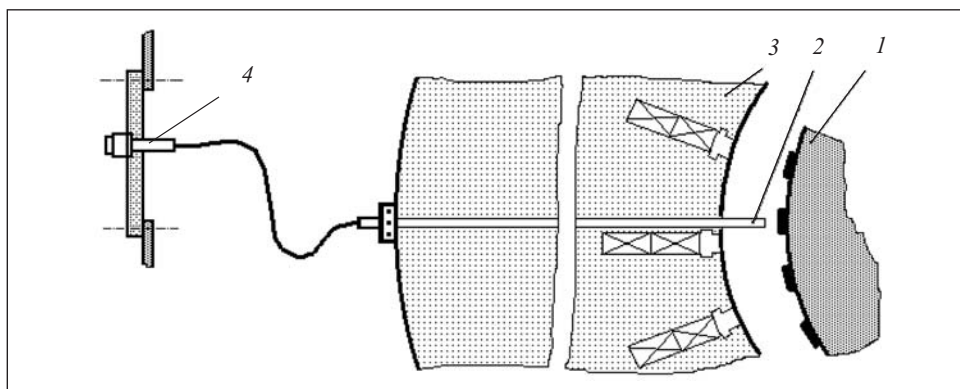


Рис. 1. Монтаж датчика на генераторе: 1 — ротор турбогенератора; 2 — датчик витковых замыканий; 3 — активная сталь статора; 4 — проходной палец

компьютер с программой Вибро-3. Особенностью созданного комплекса является использование штатной звуковой карты компьютера для оцифровки вибросигналов. Программно реализованы наблюдение и запись вибросигналов, расчет спектров и огибающих, отображение графиков виброускорения и виброскорости.

Комплекс применяется для периодической диагностики двигателей сетевых и питательных насосов на киевских ТЭЦ.

Формирование и анализ термограмм статоров турбогенераторов.

Во время плановых ремонтных работ на турбогенераторах киевских ТЭЦ необходимо выявлять места замыкания листов сердечника статора. Для этого на статоре монтируется специальный технологический виток, с помощью которого создается переменный магнитный поток. В статор запускается самодвижущаяся тележка тепловизора-дефектоскопа «Статор-1» с датчиком инфракрасного излучения, размещенным во вращающейся головке. При выявлении перегретых участков требуется ремонт статора. К сожалению, по черно-белой распечатке трудно определить конкретное значение температуры. Поэтому приходится подбирать величину усиления и многократно прогонять тележку тепловизора внутри статора.

Разработанные аппаратно-программные средства [3] позволяют проводить оцифровку выходных сигналов тепловизора, наблюдение термограмм на экране компьютера при движении тележки тепловизора внутри статора в реальном времени и запись термограмм в файлы (рис. 2). Шкала отображаемых температур позволяет по цвету интересующего участка (16 цветов) определить его температуру. Предусмотрена возможность установки различных диапазонов отображаемых температур: от обзорного — 15 — 85 °С, до произвольного участка величиной 5 °С. Отпадает необхо-

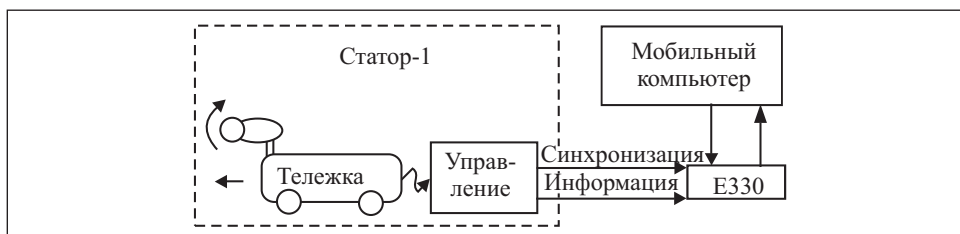


Рис. 2. Схема записи термограмм



Рис. 3. Корреляционный течеискатель К-10.3

димось в многократном прогоне тележки тепловизора внутри статора, что существенно ускоряет проведение измерений и повышает их точность.

Диагностика трубопроводов. Разработанный приборный комплекс состоит из корреляционного К-10 и акустического А-10 течеискателей. Комплекс предназначен для определения координат утечек на подземных трубопроводах теплоснабжения и других инженерных коммуникациях. Использование разработанных методик поиска утечек на трубопроводах тепловых сетей [4, 5] позволило получить достаточно высокие, практически подтвержденные, показатели достоверности: на трубопроводах длиной от 10 до 600 м диаметром от 70 до 1200 мм вероятность определения утечки с ошибкой не более 0,5 м составляет 95 %. В состав корреляционного течеискателя входят вибродатчики с магнитными держателями, радиоканалы для передачи сигналов и ноутбук как основной вычислительный блок и индикатор полученных данных (рис.3).

При выполнении аварийных работ датчики устанавливаются непосредственно на трубопровод. Оператор имеет возможность наблюдать осциллограммы и спектры вибросигналов в реальном времени, измерять их уровни, записывать выборки вибросигналов для расчета корреляционных функций с высокой точностью, проводить вторичный анализ корреляционных функций, выделять признаки наличия утечек определять их координаты.

наты. Имеется встроенная таблица скоростей распространения вибросигналов. Координация и удобство работы на протяженных трубопроводах обеспечивается интегрированной речевой связью. В приборном комплексе реализованы автоматическая регулировка усиления (АРУ) вибросигналов, система «Защита слуха», автоматический выбор мощности радиоканалов, дистанционное включение радиоканалов и др.

Контроль параметров движения. Разработанный прибор ИКПЛ-М2 [6] предназначен для измерения кинематических и динамических параметров различных механизмов: угловых и линейных перемещений, скоростей и ускорений. В его состав входят измерительный преобразователь (ИП) на основе оптоэлектронного инкрементного датчика, мобильный компьютер с оригинальным программным обеспечением, торцевая насадка, обрешиненный ролик, комплект монтажных приспособлений. В ИП угол поворота входного вала преобразуется в последовательность цифровых данных, которые передаются в компьютер (RS-232, 115 кбит/с), где выполняется необходимая обработка данных, регистрация и отображение в графическом виде параметров движения исследуемых механизмов. Одновременное отображение трех параметров движения — координат, скорости и ускорения — позволяет более полно изучать поведение различных механизмов.

В программное обеспечение прибора введены некоторые специфические для подъемно-транспортного оборудования опции, например имитация чувствительности человеческого организма к низкочастотной вибрации с использованием специальной цифровой обработки исходных данных. По результатам метрологической аттестации ИП определены следующие допустимые погрешности в процентах (возможны различные единицы измерения):

Линейное и угловое перемещение	0,5
Линейная и угловая скорость	1,0
Линейное и угловое ускорение	4,0

В режиме измерения угла поворота ИП различает 10 000 дискрет на 360 °.

Разработана методика измерения кинематических и динамических характеристик лифтов с применением ИКПЛ-М2. Основные этапы испытаний следующие:

измерение скорости и ускорения кабины в режиме «Ревизия», при номинальной скорости кабины и увеличенной ее загрузке;

измерение параметров движения при сбросе кабины на ловители и буферы;

измерение скорости движения дверей лифта и скорости вращения оси двигателя механизма ее привода.

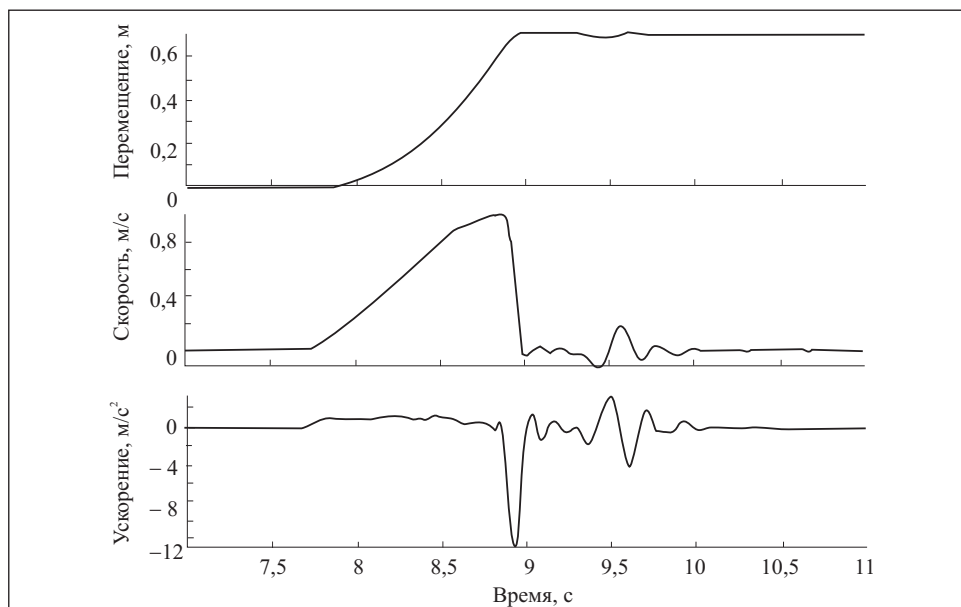


Рис. 4. Графики параметров сброса кабины лифта на ловители

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты испытаний пассажирского лифта при сбросе кабины на ловители. Максимальное ускорение торможения — $13,06 \text{ м/с}^2$ (допуск $25,0 \text{ м/с}^2$), среднее ускорение торможения — $8,8 \text{ м/с}^2$. (допуск $1,96\text{—}9,81 \text{ м/с}^2$).

В настоящее время измерители изготавливаются по заказам экспертно-технических центров системы Госнадзорохранатруда и успешно применяются при экспертизе лифтов во многих городах Украины.

Теплометрический мониторинг. Для контроля качества теплоизоляции и потерь теплоносителя в системах теплоснабжения разработан АПК для многоканальной регистрации температуры ТермоЛог [7]. В комплекс входят цифровые температурные датчики с магнитным держателем ТДМ-1 (рис. 5), малогабаритные автономные устройства для многоканального измерения и регистрации температуры ТермоЛог-8, комплект кабелей и PC-совместимый компьютер с оригинальным программным обеспечением.

Цифровой датчик ТДМ-1 построен на основе микросхемы DS1624, имеющей разрешающую способность $0,03125 \text{ }^\circ\text{C}$. Автономное устройство ТермоЛог-8 предназначено для регистрации показаний восьми датчиков температуры в течение нескольких суток с интервалом 1 с.

Для подключения регистраторов к компьютеру применяется COM-порт. Специальное программное обеспечение позволяет проводить измерение и индикацию текущей температуры датчиков в цифровом виде и в виде

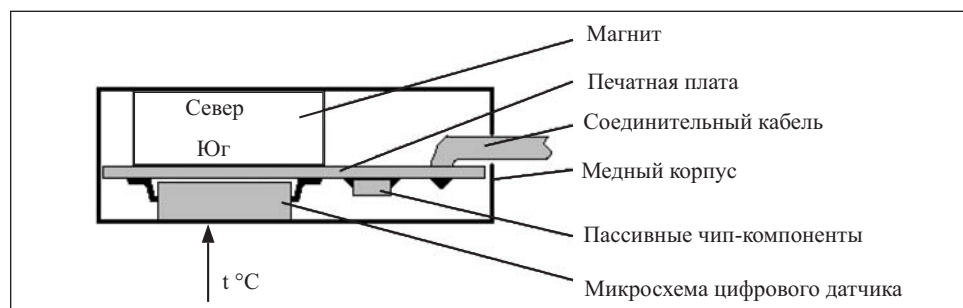


Рис. 5. Датчик температуры ТДМ-1

временных трендов, программировать часы реального времени и таймер автоматической записи данных в автономном режиме, считывать массивы накопленных данных и другие операции.

Метрологическое обеспечение средств технической диагностики.

Высокая степень износа большей части основного технологического оборудования в энергетике, на транспорте и в производстве, а также возрастающие требования к безопасности, экологии и экономичности обусловили бурное развитие систем диагностики, управления и аварийной сигнализации. При этом становится весьма актуальной автоматизация процессов периодической проверки и аттестации датчиков и узлов этих систем.

Автоматизированная виброкалибровочная установка АВКУ-1.1 [8] предназначена для точного измерения и регистрации характеристик виброизмерительных преобразователей (ВИП) и различных электронных устройств. Установка (рис. 6) создана на базе PC-совместимого компьютера, специализированного электронного блока и стандартного вибростенда.

Функции, выполняемые компьютером: организация интерфейса с оператором; управление электронным блоком и прием массивов выборок; выполнение расчетных операций.

Основные функции, выполняемые электронным блоком: генерация синусоидального сигнала; управление вибростендом; усиление и фильтрация входных сигналов; формирование и передача массивов выборок.

Управление всеми ресурсами электронного блока осуществляется по параллельному интерфейсу. Синусоидальный генератор построен на базе цифрового синтезатора частоты. Диапазон перестройки частоты: 0,1 — 25 119 Гц. Предусмотрено три варианта автоматической развертки по частоте при проведении измерений: 10, 30 и 90 шагов на декаду, что соответствует стандартным рядам по ГОСТ 17168-82.

Два предварительных усилителя, к которым возможно подключение вибродатчиков с различным интерфейсом, имеют регулируемый коэф-

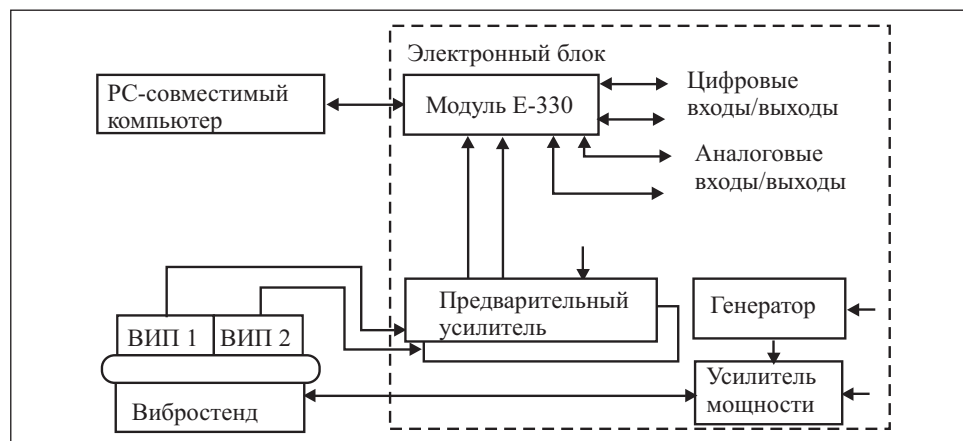


Рис. 6. Структурная схема установки АВКУ-1.1

фициент усиления. Во всех режимах работает система автоматической регулировки усиления предварительных усилителей.

В зависимости от требуемого диапазона частот применяется один из двух вибростендов: широкодиапазонный стенд 4810 Брюль и Кьер (40—18 000 Гц) или мощный низкочастотный стенд ESE-201 РФТ Мессэлектроник «Отто Шейн» (20—8000 Гц).

Основное назначение АВКУ — сравнительная градуировка акселерометров. Для этого на вибростенд устанавливается два ВИП: эталонный (1) и измеряемый (2). В автоматическом режиме АВКУ последовательно устанавливает заданный уровень виброускорения в заданном диапазоне частот и определяет характеристики измеряемого ВИП.

В установке реализованы следующие дополнительные режимы работы: автоматическое измерение амплитудно-частотных характеристик различных электронных блоков;

автоматическое измерение характеристик октавных и третьоктавных фильтров первого, второго и третьего классов по ГОСТ 17168-82;

автоматическое измерение характеристик фильтров типа *A*, *B* и *C* (первого и второго классов) по ГОСТ 17167-81;

автоматическое измерение характеристик конденсаторных измерительных микрофонов (в базу данных внесены данные о дифракционных поправках 18-ти наиболее распространенных типов микрофонов (4131, 4133, МК221 и др.).

измерение спектра и быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Аппаратно-программный комплекс «Акустик» [9] предназначен для проведения измерений в акустической камере по заранее намеченной программе, автоматического документирования полученных результатов

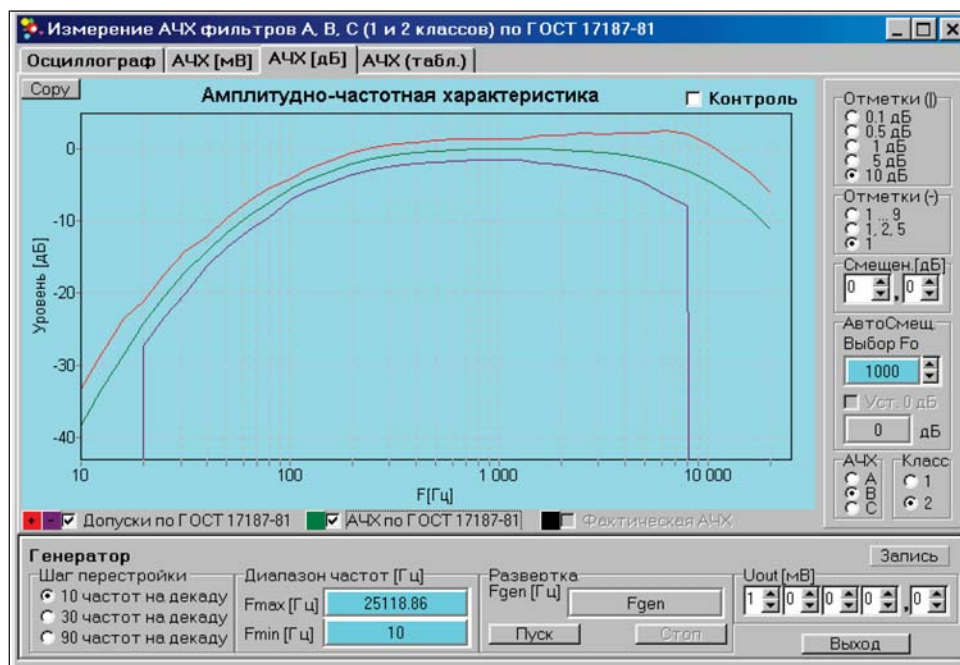


Рис. 7. Формат измерения параметров фильтров шумомеров

и составления отчетов. В АПК входят электронный блок «Акустик-1.1», PC-совместимый компьютер и оригинальное программное обеспечение.

Блок «Акустик-1.1» содержит синусоидальный генератор на базе цифрового синтезатора частоты, два измерительных канала с регулируемым коэффициентом передачи от -20 до $+60$ дБ с шагом 10 дБ и 16-тиразрядными АЦП, управляющий контроллер. Каждый измерительный канал имеет входы усилителя заряда, усилителя напряжения, вход для подключения стандартного микрофонного усилителя (МУ). Электронный блок подключается к компьютеру с помощью интерфейса *USB*.

Предусмотрены режимы измерения характеристик микрофонов, в том числе с учетом дифракционных поправок, измерение параметров октавных и третьоктавных фильтров, фильтров с характеристиками *A*, *B* и *C* шумомеров, двухканальный осциллограф и вольтметр, третьоктавный анализатор спектра, БПФ и др. На рис. 7 приведен формат измерений характеристик стандартных фильтров *A*, *B* и *C* шумомеров в соответствии ГОСТ 17187-81.

Аппаратно-программный комплекс «Диаграмма» [10] предназначен для проведения точных автоматизированных измерений диаграмм направленности микрофонов и других устройств внутри акустической

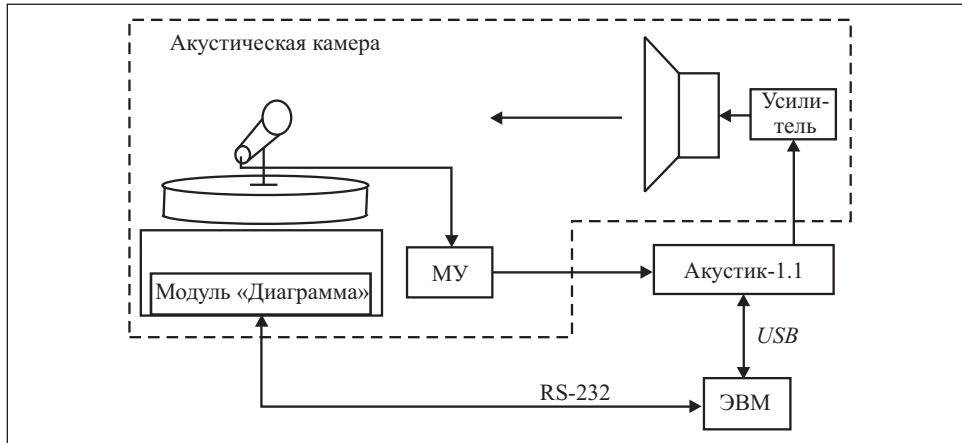


Рис. 8. Структурная схема АПК «Диаграмма»

камеры (рис.8). Измерения проводятся с помощью электронного блока «Акустик-1.1».

В качестве устройства, задающего угловые положения исследуемых объектов, использован модернизированный поворотный стол ТУР 01012, RFT, Германия. Внутри его корпуса смонтирован специально разработанный модуль «Диаграмма-1.1» с оптоэлектронным инкрементным датчиком угла поворота. Контроллер модуля «Диаграмма» обрабатывает данные с инкрементного оптоэлектронного датчика угла поворота, опрашивает состояние кнопок ручного управления, принимает команды и передает данные, управляет работой двигателя поворотного стола. Реализованы два режима работы: режим ручного управления (используется при монтажных работах и при калибровках) и режим дистанционного управления (направление вращения и угол поворота задается с внешнего компьютера по интерфейсу RS-232). В обоих режимах модуль периодически (100 раз в секунду) выдает во внешнюю ЭВМ текущий угол поворота стола.

Основные метрологические характеристики модернизированного поворотного стола с модулем «Диаграмма» следующие:

Точность измерения угла поворота.	0,2 град
Точность автоматического позиционирования . . .	0,5 град
Скорость вращения монтажной платформы	0,75 об/мин

Выводы. Преимущества предлагаемого подхода к построению новых средств диагностики заключается в следующем.

Минимизируются затраты времени и средств на разработку специального оборудования.

При использовании мобильного компьютера автоматически решается задача оснащения диагностического комплекса необходимыми вычислительными ресурсами, устройствами отображения, печати, сетевой интеграции и системой электропитания.

Модернизация системы сводится к созданию усовершенствованной версии программного обеспечения.

Естественно решается задача создания и сопровождения базы данных по контролируемому оборудованию, режимам его работы.

Мобильный компьютер может использоваться поочередно в нескольких АПК для контроля и диагностики состояния различного оборудования. При этом достигается существенная экономия финансовых средств.

Интеграция разработанных программных средств с различными редакторами, геоинформационными системами, математическими пакетами существенно расширяет их функциональные возможности.

Разработка прикладного программного обеспечения комплекса может проводиться на обычных РС-совместимых офисных компьютерах с применением языков высокого уровня и современных объектно-ориентированных сред программирования. Производительность работ и надежность разработанных программ повышается за счет повторного использования собственных и сторонних компонент.

Единообразие пользовательских интерфейсов различных АПК упрощает и ускоряет их освоение эксплуатирующим персоналом.

Methods, hardware and software are represented for control and diagnostics of power and power-intensive equipment.

1. *Безprozванный А. А., Молодых С. А., Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Программно-технический комплекс для контроля короткого замыкания витков ротора генераторов ТВВ и ТВФ//Моделирование та інформаційні технології: Зб. наук. праць.— Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2001. — Вип. 7. — С. 55—57.
2. *Владимирский А. А., Владимирский И. А., Безprozванный А. А., Вова Н. И.* Аппаратно-программные средства для анализа спектров вибраций повышенного разрешения// Там же. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2001. — Вип. 8. — С. 43—45.
3. *Владимирский А. А.* Усовершенствование методики выявления мест замыкания листов сердечника статора турбогенератора//Там же. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2001. — Вип. 10. — С. 67—69.
4. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Совершенствование методики поиска утечек с применением приборного комплекса К-10.2/А-10//Зб. наук. праць. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2003. — Вип. 20. — С.134—138.
5. *Владимирский А. А.* Особенности структуры корреляционных течеискателей семейства «К-10»//Моделирование та інформаційні технології: Зб. наук. праць. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2003. — Вип. 20. — С. 35—42.

6. Владимирский А. А., Владимирский И. А., Дьяченко В. П., Гоян И. Н. Измеритель параметров движения механизмов лифтов//Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2002. — № 3 (7). — С. 26—27.
7. Владимирский А. А., Владимирский И. А. Аппаратно-программный комплект для многоканальной регистрации температуры//Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць. — Київ : Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2005. — Вип. 30. — С. 30—32.
8. Владимирский А. А., Владимирский И. А., Иващенко А. П. Разработка автоматизированной виброкалибровочной установки//Там же. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2004. — Вип. 27. — С.31—34.
9. Владимирский А. А., Владимирский И. А. Разработка аппаратно-программного комплекса для акустических измерений//Зб. наук. праць. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2005. — Вип. 30. — С. 34—37.
10. Владимирский А. А. Разработка аппаратно-программного комплекса для измерений диаграмм направленности микрофонов в акустической камере//Там же. — Київ: Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2005. — Вип. 31. — С. 21—24.

Поступила 01.09.06

ВЛАДИМИРСКИЙ Александр Альбертович, канд. техн. наук., ст. науч. сотр. Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1981 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы диагностики состояния энергетических объектов, методы обработки сигналов, достоверность результатов диагностики, моделирование.

ВЛАДИМИРСКИЙ Игорь Альбертович, канд. техн. наук., начальник лаборатории службы научно-технических разработок и диагностики «Энергоналадка Киевэнерго» АК «Киевэнерго». В 1987 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы диагностики состояния энергетических объектов, распространение виброакустических и тепловых волн по трубопроводам, моделирование, достоверность оценок параметров сигналов и результатов диагностики.