

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

А.А. Красовский (Компания "Электронные технологии и метрологические системы")

Рассматриваются теоретические методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), способы практической реализации экспериментов в промышленных и лабораторных измерениях и испытаниях с применением программно-аппаратного комплекса ZETLab. Приводится пример определения пространственных координат источника вибрации (или шума) низкой интенсивности в масштабе РВ. За основу в планировании и построении экспериментов взята идеология виртуальных приборов (ВП), но с применением реально существующей аппаратной части в виде сейсмодатчиков и модулей аналого-цифрового преобразования (АЦП), имеющих интерфейс с ПК как связующая часть между объектом измерения, математическим аппаратом и оператором. Основу логики работы представленного метода определения координат составляют спектральный, корреляционный анализ сигналов с последующей визуализацией с применением метода обратных проекций.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), анализатор спектра, виртуальные приборы, цифровая обработка сигналов, фильтрация, акселерометр, сейсмо датчик.

При решении любой задачи в области научных исследований, при проведении комплексных испытаний или автоматизации экспериментов рано или поздно разработчик сталкивается с проблемой практической реализации своих научных трудов или, если угодно, с воплощением своих задач в жизнь. Именно эта стадия жизненного цикла разработки затягивается на неопределенное время, что естественно, влечет за собой нежелательные финансовые издержки, и чем эта стадия длиннее, тем больше потерь, во многих смыслах, и тем меньше идей удастся воплотить в жизнь. Но возможно минимизировать время построения системы за счет использования модульных программных и аппаратных решений.

Например, возникает задача построить систему, умеющую: воспринимать информацию о состоянии контролируемого объекта; производить обработку входного сигнала (или, что математики обычно называют функцией) [1]; проводить математическую обработку этого сигнала с последующей выдачей управляющих сигналов и выводом рекомендаций оператору.

Подобные задачи легко решаются с применением программно-аппаратного комплекса ZETLab компании "Электронные технологии и метрологические системы" (г. Зеленоград), имеющего в своем составе около 100 виртуальных приборов¹ различного назначения, а также широкий круг приборов, решающих комплексные задачи по сбору и обработке данных. Что главное, сегодня трудно назвать датчик² (первичный преобразователь), который нельзя было бы подклю-

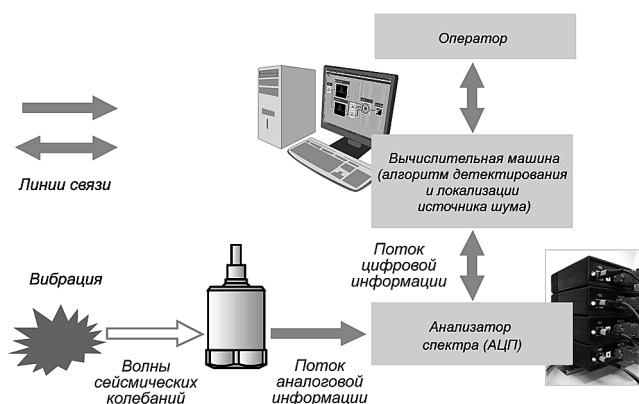


Рис. 1. Блок-диаграмма прохождения данных в системе

чить к ZETLab, а, как известно, датчик — глаза и уши любой системы.

В качестве рабочего примера, демонстрирующего возможность как аппаратной, так и программной (математической) части, рассмотрим задачу определения пространственных координат источника вибрации или шума. Для небольшого усложнения задачи оговоримся — это источник низкой интенсивности, соизмеримой или даже ниже уровня фоновых шумов. Например, это могут быть шумы техногенного характера (от автострады, путей железнодорожного сообщения, двигателей насосной станции, помехи промышленной сети 50 Гц и т.п.), шумы природного характера (журчание воды), которые нельзя ни отменить, ни запретить. Однако, воспользовавшись математическим

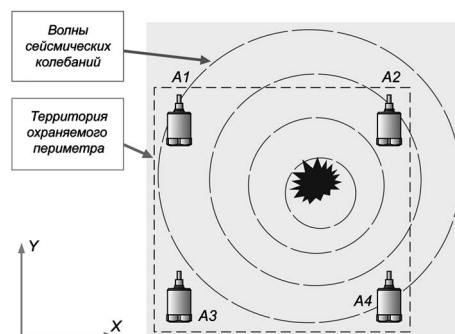


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

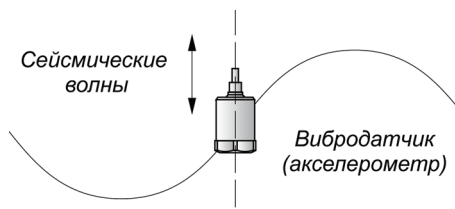


Рис. 3. Распространение поперечных волн колебаний

¹ Виртуальный прибор — система организуется в виде программной модели некоторого реально существующего прибора, программно реализуются не только средства управления, но и логика работы прибора [4].

² Речь идет о большинстве серийно производимых датчиках, имеющих стандартные уровни выходного сигнала, а также о датчиках собственного производства, обеспечивающих выходной сигнал в разумных пределах.

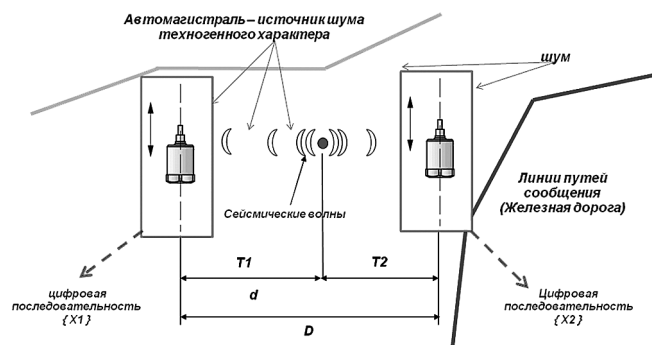


Рис. 4. Схема эксперимента, приближенного к реальным условиям

аппаратом ZETLab, можно выделить интересующий полезный сигнал.

Постановка задачи: существует некая территория, на которой необходимо контролировать и выявлять факты несанкционированного проникновения, например, подкоп. Если, все-таки факт проникновения есть, необходимо постараться определить координату этого места. Система состоит из:

- сейсмотатчиков, воспринимающих вибрацию грунта;
- линии передачи связи, обеспечивающей передачу сигнала от датчиков до измерительной аппаратуры;
- непосредственно регистрирующей измерительной аппаратуры ZETLab;
- пульта оператора — ПК.

Для решения задачи воспользуемся научным подходом и проанализируем, какие же параметры системы могут косвенно информировать о несанкционированном проникновении.

Этап №1, теоретические выкладки. В месте возникновения вибрации (или шума) формируются сейсмические волны, распространяющиеся во всех направлениях (рис. 1, 2), при достижении сейсмотатчиков, распространяющаяся волна воздействует на них. Экспериментально выявлено, что максимальный энергетический вклад в сигнал вносят волны поперечных колебаний (рис. 3), поэтому, используемые датчики имеют только од-

³ Уровень первичных преобразователей.

ну компоненту чувствительности и устанавливаются вертикально — на землю (либо горизонтально — на стену). Далее посредством АЦП сигнал с датчиков оцифровывается и уже в цифровом виде поступает на вход алгоритма локации. Итак, исходя из предварительных теоретических выкладок, составим блок-диаграмму прохождения данных с нижнего уровня³ до оператора.

Основой используемого алгоритма пассивной локации источников вибрации (шума) является определение методом взаимного корреляционного анализа сигналов разности временных задержек прихода волны на разные пункты регистрации, расположенные (желательно) по периметру охраняемого объекта, используя формулу

$$B_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t - \tau) dt,$$

где B_{12} — функция взаимной корреляции между датчиками 1 и 2 и т.д., перечисляя все выбранные нами пары датчиков [2].

В действительности, на первой стадии рис. 2 описывает идеальную модель, и было опущено самое главное условие — наличие посторонних шумов. Модифицируем схему эксперимента (рис. 4), где особо выделено наличие автомагистралей и путей ЖД сообщений.

Этап №2. Изучим временную реализацию сигнала при воздействии на грунт вблизи одного из датчиков (осциллограмма сигнала, рис. 5). Тем самым проверим целостность линий связи и настройки системы.

Проанализируем частотные составляющие сигнала, то есть частотный спектр, и оценим, каково же влияние посторонних шумов на датчики в отсутствии и при наличии полезного сигнала (на рис. 6 приведен весь воспринимаемый частотный диапазон, в данном случае анализ в узких частотных полосах не производится, спектр рис. 7 приведен в более детальном виде).

Для очистки спектра сигнала, полученного с сейсмо датчика, от помехи 50 Гц и ее гармоник воспользуемся программой, реализующей алгоритм адаптивной фильтрации, входящей в комплект ZETLab (при адаптации с обратной связью автоматически вносятся коррекции в алгоритм с целью оптимизации параметров функционирования системы [3]).

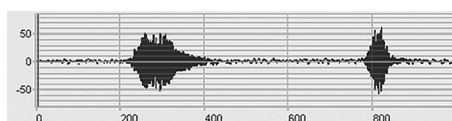


Рис. 5. Воздействие на грунт вблизи одного из датчиков

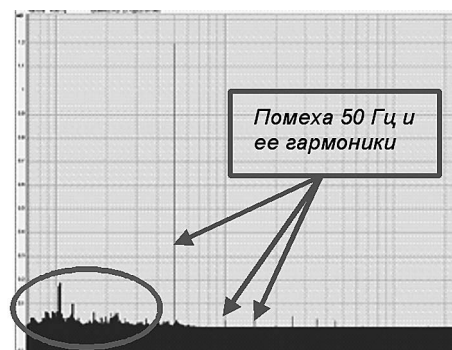


Рис. 6. Воздействие полезного сигнала отражается в области низких частот

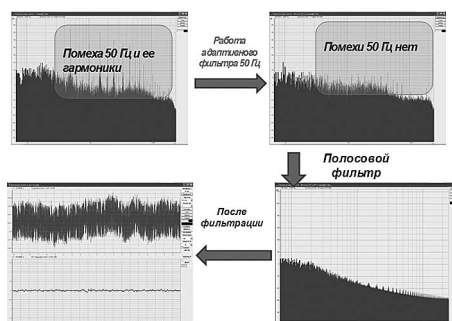


Рис. 7. Сигнал до и после цифровой фильтрации (адаптивный фильтр 50 Гц и полосовая фильтрация 10...100 Гц)

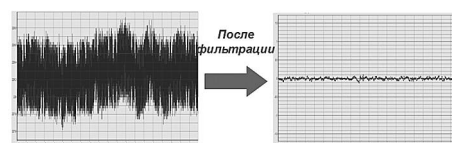


Рис. 8. Временная реализация сигнала до и после цифровой фильтрации (осциллограммы приведены в одинаковом масштабе по координатным осям)

Выбор частот среза полосовых фильтров, обеспечивающих фильтрацию частот, не имеющих отношения к полезному сигналу.

Изучив спектр полезного сигнала (рис. 6) можно увидеть, что максимальный энергетический вклад в сигнал вносят волны, находящиеся внутри частотного диапазона 10...100 Гц, ограничение по верхней частоте связано с быстрым затуханием волны колебаний грунта (то есть поглощение волны). Ограничение по низким частотам связано с длинами волн и расстоянием, на котором мы производим измерения. Допустим, охраняемый периметр — 500x500 м, скорость распространения волны в грунте (песчано-земляная смесь) приблизительно $v = 1000$ м/с (реально скорость волны может изменяться в зависимости от качества грунта), длина волны $\lambda = v/\nu$, следовательно, волна с частотой $\nu = 0,1$ Гц будет иметь длину 10 км, что явно излишне для 500-метровой зоны. Естественно, такого рода волны будут вносить негативный вклад в исследуемый сигнал. В то же время волна с частотой $\nu = 10$ Гц соответствует 100 м, что вполне допустимо.

Оценим, каков выигрыш сигнала, прошедшего цифровую обработку ZETLab по сравнению с первоначальным сигналом.

Дисперсия в сигнале до обработки составляет 1 мВ, после обработки 0,2 мВ, разница в 5 раз (или $20 \lg 5 = 14$ дБ), что более чем существенно.

И только теперь, применяя формулу корреляционного анализа

$$B_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)s_2(t-\tau)dt,$$

можно получить адекватный результат, по которому приблизительно оценивается направление на источник вибрации. Функция взаимной корреляции между двумя сейсмо датчиками представлена на рис. 9, где линией обозначен корреляционный пик, возможно этот пик возник по причине воздействия на грунт искомого объекта, однако на данном этапе проверить это не представляется возможным.

Этап №3. Предположим, что временная задержка, соответствующая максимальному корреляционному пику, в пересчете на расстояние действительно даст координату источника вибрации. Произведем пересчет временной задержки в координату вдоль прямой между датчиками. Однако не стоит забывать о том, что взаимная корреляционная функция показывает лишь разность прихода волны на

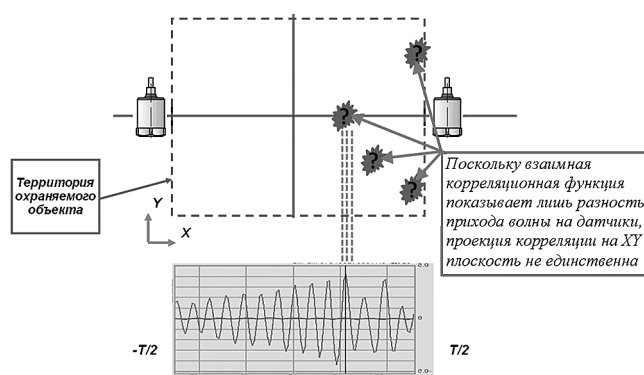


Рис. 9. Функция взаимной корреляции между двумя датчиками

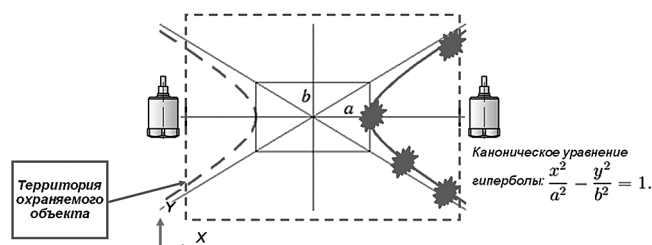


Рис. 10. Область равновероятных координат источника вибрации описывается уравнением гиперболы

два пункта регистрации. И если смотреть расположение возможных координат относительно друг друга, то они описываются уравнением гиперболы (рис. 10). Именно поэтому подобную задачу нельзя решать, используя только два датчика, но для получения удовлетворительного решения достаточно трех датчиков. В схеме примера введено четыре датчика, что позволяет рассматривать шесть корреляционных пар и существенно повышает достоверность определения координат.

Далее отсчеты корреляционных функций от каждой пары датчиков с соответствующей временной задержкой методом обратных проекций сопоставляется каждой точке заданной XY плоскости — формируется двумерный массив. Каждый элемент массива соответствует определенной зоне охраняемого периметра и содержит "энергетический вклад" данной зоны в общий уровень шума. Подобный расчет двумерного массива происходит для каждой корреляционной пары и суммируется с предыдущими массивами. Результатом работы алгоритма является графическое отображение (XY-грамма), на котором постепенно проявляется место, соответствующее координате воздействия источника шума на грунт ох-

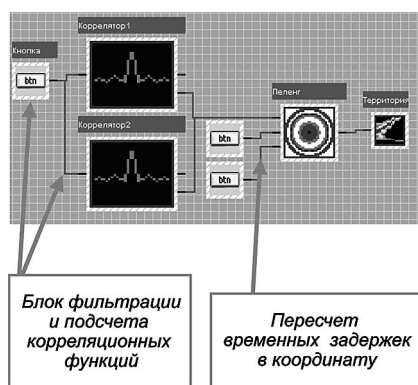


Рис. 11. Функциональная блок-схема алгоритма локации

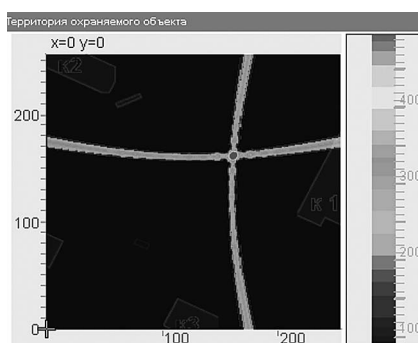


Рис. 12. Результат работы алгоритма локации (от трех датчиков и двух корреляционных функций)

раняемого периметра. Функциональная схема эксперимента представлена на рис. 11, а результат работы описанного алгоритма — на рис. 12.

Полученный алгоритм основан на фильтрации помех, накоплении "энергии", полученной от каждой точки пространства, и ее представлении. В отличие от традиционных методов определения пеленга объекта, настоящий алгоритм учитывает воздействие всех значений корреляционной функции, поскольку в действительности Δt максимального корреляционного пика не соответствует временной задержке прихода сейсмической волны на датчики от искомого объекта. Благодаря отсутствию привязки к какому-то определенному корреляционному пику данный метод обладает преимуществом слежения сразу за несколькими целями, что в решении реальных задач локации очень важно.

Таким образом, основными преимуществами настоящей системы, построенной на программно-аппаратном комплексе ZETLab, являются: высокая чувствительность, быстрое время локализации, точное определение координат, обеспечение слежения над несколькими объектами, высокая степень достоверности, высокая степень автоматизации процесса, обнаружение в масштабе РВ.

Список литературы

1. Гринуин В.Г. Глоссарий по цифровой обработке сигналов. АВТЭКС. С-Петербург.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер 2003.
3. Уидроу Б., Стернз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь. 1989.
4. http://ru.wikipedia.org/wiki/Виртуальный_прибор.

Красовский Андрей Александрович — технический консультант компании "Электронные технологии и метрологические системы".

Контактный телефон (495) 744-81-60. E-mail: KrasovskiyAndrey@mail.ru, info@zetms.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОБКАТКИ И ИСПЫТАНИЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Н.В. Киянов, О.В. Крюков (ООО "Интермодуль"),
В.Г. Титов (НГТУ им Р.Е. Алексеева)**

Рассмотрены актуальные проблемы проектирования современных нагружающих устройств для стендовых испытаний автотракторных двигателей с оценкой их энергоэффективности и конкурентоспособности. Приведены структуры промышленных испытательных систем тепловых двигателей и программы их стендовых испытаний.

Ключевые слова: стендовые испытания, автотракторные двигатели, нагружающие устройства, автоматизированный испытательный стенд, нагрузочная диаграмма обкатки, программа испытаний.

Роль стендовых испытаний в производстве новых двигателей

Одним из наиболее важных этапов проектирования, разработки и производства новой техники являются испытания. В процессе испытаний определяются качественные и количественные характеристики изделий, проверяются принятые технические решения, находятся слабые звенья. При испытаниях имитируются не только реальные нагрузки механизмов, но и воспроизводятся экстремальные условия работы, создаются режимы, сопровождающиеся ускоренным износом отдельных узлов. Все это позволяет еще на стадии разработки и создания опытных образцов новой техники провести проверку всех узлов и агрегатов, и, что особенно важно, сократить сроки передачи изделий в серийное производство.

Поэтому процесс испытаний следует считать важнейшим и неотъемлемым этапом разработки и создания любого вида сложной техники. Адекватное и высококачественное проведение испытаний требует реализации целого комплекса испытательного оборудования, включая приводные и нагрузочные устройства, первичные измерители и преобразователи параметров, устройства защиты и индикации, сбора и анализа информации, АСУ процессом испытаний и др. При этом функциональное назначение испытываемого объекта определяет и функ-

циональные характеристики испытательного оборудования.

Автотракторные двигатели (АТД) в настоящее время являются одним из основных средств энергетики, используемых в различных отраслях промышленности. Большая часть из них — это двигатели мощностью до 400 кВт. Главные задачи их совершенствования — повышение энергоэффективности, надежности и снижение токсичности — невозможно решить без квалифицированных стендовых испытаний [1] с использованием новейшей контрольно-измерительной и управляющей техники и соответствующего прикладного ПО [2,3], объединенных в единый комплекс АСУ стендовыми испытаниями.

Основными направлениями в развитии испытательных стендов АТД является автоматизация управления испытаниями. Именно комплексная АСУ испытаниями позволяет:

- повысить качество и технические характеристики новых двигателей;
- оптимизировать режимы и обеспечить достоверность стендовых испытаний;
- ускорить проведение испытаний, обработку их результатов и оформление технической документации;
- снизить потери топлива при испытаниях;
- снизить численность оперативного персонала и влияние человеческого фактора на проведении испытаний.