

Нормализация ультразвуковых импульсов в системах измерения задержки и расстояния Бархатов В.А.

В работе рассматривается задача коррекции переднего фронта ультразвуковых импульсных сигналов с целью приведения их к одинаковому виду, пригодному для измерения задержки методом перехода через ноль. Предлагается способ синтеза фильтра-корректора с помощью поискового алгоритма. Рассматриваются результаты численного моделирования данной задачи.

В настоящее время существует большой ряд эхо-импульсных ультразвуковых приборов предназначенных для измерения расстояний до объектов - ультразвуковые толщиномеры, измерители уровня жидкостей или сыпучих веществ, детекторы препятствий для слепых, датчики парковки автомобилей, подводные локаторы.

В указанных устройствах определяется время задержки эхосигнала относительно зондирующего импульса. При этом широко применяется так называемый метод перехода через ноль. В зарубежной литературе используется термин zero-crossing method [1].

Сущность измерений состоит в следующем. Анализируется высокочастотный ультразвуковой сигнал - Рис.1. В схеме измерения используется аналоговый компаратор. Как только импульс превышает порог компаратора прибор выводит информацию о том, что ультразвуковой сигнал обнаружен. Далее, измерение задержки производится в момент перехода через нулевое значение.

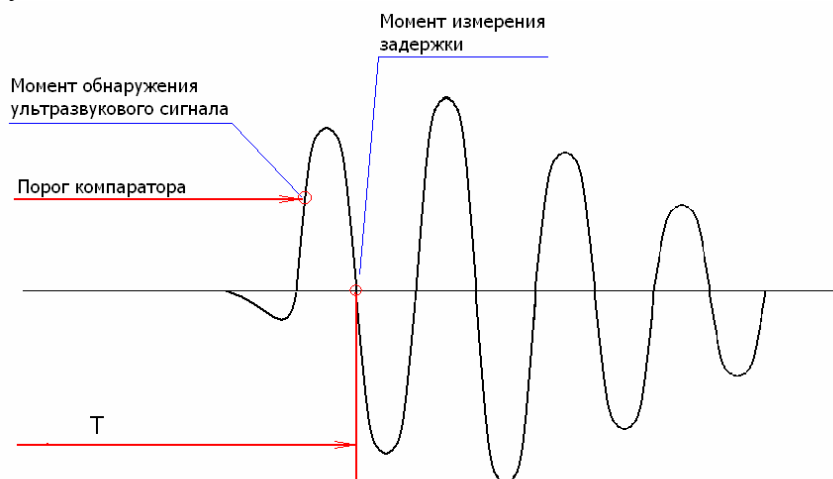


Рис.1. Измерение задержки ультразвукового сигнала методом перехода через ноль.

Главное достоинство данного способа измерений состоит в том, что найденное время задержки не зависит от амплитуды сигнала. Если сигнал превысил порог компаратора, измерение происходит автоматически.

Метод перехода через ноль при всех своих достоинствах предъявляет достаточно жесткие требования к форме ультразвукового сигнала. Необходимо обеспечить высокую скорость нарастания переднего фронта. В противном случае может наблюдаться захват второго или даже третьего периода колебаний.

Практика разработки пьезопреобразователей показывает, что довольно трудно управлять формой акустических импульсов [2,3]. Обычно применяют сильное демпфирование пьезопластин, которое позволяет расширить полосу пропускания и одновременно дает возможность получить короткие ультразвуковые импульсы. Однако демпфирование сильно снижает чувствительность.

Поставим задачу скорректировать передний фронт ультразвукового сигнала таким образом, чтобы прибор давал надежные измерения. Отметим, что в современной аппаратуре производится оцифровка сигналов. Всегда есть возможность получить и сохранить в компьютере образец ультразвукового импульса. Следовательно, можно создать фильтр оптимальный именно для данного преобразователя. Обработку реальных сигналов удобно проводить с помощью цифрового фильтра.

Немного теории [4,5]. Как известно цифровой фильтр выполняет обработку вида

$$U_i^{OUT} = \sum_{k=0}^{N-1} U_{i-k}^{IN} H_k, \quad (1)$$

где: U_{i-k}^{IN} - входной сигнал, U_i^{OUT} - выходной сигнал, H_k - коэффициенты фильтра.

Выражение (1) есть дискретный аналог интеграла свертки. Когда говорят о синтезе фильтров, подразумевается, что будут найдены коэффициенты H_k – импульсная характеристика фильтра.

Задачу синтеза как правило решают аналитически [4], выбирают желаемый сигнал на выходе фильтра, находят спектры входного и выходного сигналов, затем определяют частотную характеристику коэффициента передачи и с помощью обратного преобразования Фурье вычисляют импульсную характеристику. Но тогда получим частное решение, т.к. реальные ультразвуковые импульсы гораздо сложнее и разнообразнее, чем аналитическая модель.

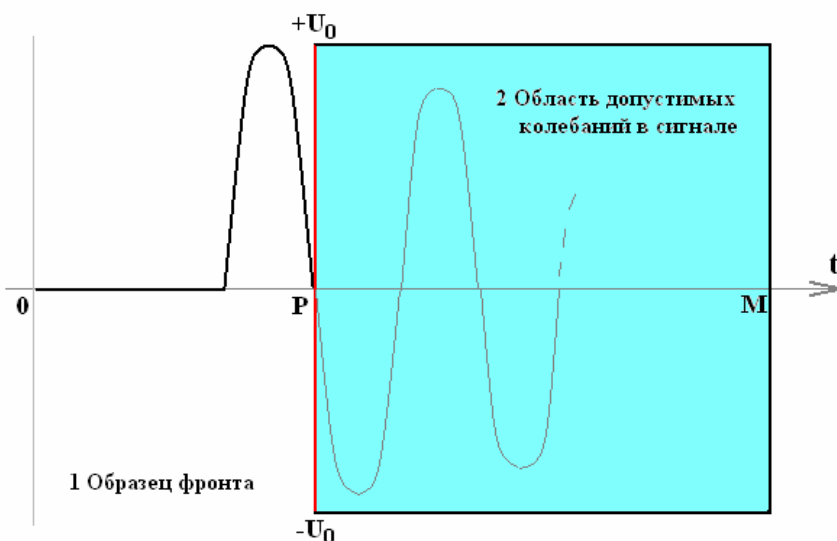


Рис.2. Критерии качества сигнала на выходе фильтра.

В статье предлагается общий подход к синтезу фильтра-корректора с помощью поискового алгоритма, который минимизирует некоторую целевую функцию.

Вначале обсудим критерии поиска. Предположим, что первичный ультразвуковой импульс (Рис.1.) обрабатывается фильтром (1). Коэффициенты фильтра мы можем менять. Естественно изменяется и сигнал на выходе. Определим, какие реакции фильтра более предпочтительны. Область сигнала на выходе фильтра разделим на две части - Рис.2. Первая часть – образец желаемого переднего фронта, диапазон индексов от 0 до P. Здесь имеется интервал нулевых значений и полупериод сигнала на основной частоте. Вторая часть – область допустимых колебаний, значения индексов от P до M. Для надежной работы метода перехода через ноль

важно, чтобы последующие полупериоды сигнала не превышали по амплитуде первый полупериод, т.е. колебания в области 2 могут быть какими угодно, лишь бы они не выходили за пределы амплитудных порогов $+U_0$ и $-U_0$.

Теперь выберем целевую функцию в виде

$$\Psi = \sum_{i=0}^{P-1} (U_i^{OUT} - U_i^F)^2 + \sum_{i=P}^M \left\langle \text{if } U_i^{OUT} > +U_0 \text{ then } (U_i^{OUT} - U_0)^2 \text{ else } 0 \right\rangle + \\ + \sum_{i=P}^M \left\langle \text{if } U_i^{OUT} < -U_0 \text{ then } (U_i^{OUT} + U_0)^2 \text{ else } 0 \right\rangle + \quad (2) \\ + \sum_{i=0}^M (U_i^{OUT-N})^2$$

Первое слагаемое в целевой функции представляет суммарную квадратичную ошибку между выходным сигналом фильтра и образцом переднего фронта. Здесь суммирование производится в первой области (Рис.2). Второе и третье слагаемое содержат сумму квадратов выходного сигнала фильтра вышедшего за пределы области 2 (Рис.2).

Последнее слагаемое в целевой функции есть сумма квадратов реакции фильтра на шум. Необходимость в этом критерии обусловлена тем, что первичный ультразвуковой импульс имеет ограниченный спектр. Есть опасность, что поисковый алгоритм будет формировать высокий коэффициент передачи фильтра на частотах за пределами спектра ультразвукового сигнала. Если взять дополнительно образец широкополосного шума и потребовать, чтобы фильтр давал минимальную реакцию на шум, то тогда фильтр-корректор автоматически будет иметь оптимальную полосу пропускания и, следовательно, он станет наиболее устойчивым к шумовым воздействиям.

Задача поискового алгоритма – найти набор коэффициентов H_k , который минимизирует целевую функцию Ψ . Хорошие результаты дает случайный поиск. Выполняется последовательность действий, приведенных ниже.

1. Подготовка задачи. Исходный ультразвуковой сигнал U_i^{IN} сохраняют в ЭВМ. Генерируют образец шума F_i и параметры желаемого выходного сигнала U_i^F , U_0 (см. Рис.2). Все коэффициенты фильтра устанавливают в ноль $H_k = 0$.
2. Производят расчет целевой функции Ψ .
3. Коэффициенты фильтра корректируют, прибавляя к ним небольшие значения случайного сигнала. Используется датчик случайных чисел.
4. Производят новый расчет целевой функции.
5. Проверка, если целевая функция уменьшилась, принимают новые значения коэффициентов фильтра. Если нет, коррекция коэффициентов этапа 3 отменяется.
6. Переход на этап 3, замыкание цикла. Здесь же проводится проверка окончания алгоритма по заданному количеству циклов.

Проведем апробацию предложенного алгоритма с помощью численных экспериментов. Для этой цели автором была создана специальная программа, которая выполняет все необходимые расчеты, имеет интерфейс ввода данных и представляет результаты моделирования в графическом виде.

Итак, на Рис.3А показан типичный ультразвуковой импульс с частотой заполнения 2,5МГц. Постоянная времени переднего фронта 1 мкс, заднего фронта 4мкс. Частота дискретизации 80МГц. Использована эмпирическая формула

$$U(t) = A \exp^2(-\alpha_2 t) (1 - \exp^2(-\alpha_1 t)) \cos(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где: A - амплитуда, α_1, α_2 - постоянные времени нарастания и спада сигнала, ω - круговая частота, φ - фаза.

Для нахождения коэффициентов фильтра использовался ранее представленный поисковый алгоритм. Дополнительный сигнал шума изображен на Рис.3.Б. Длина фильтра выбрана 120 отсчетов (коэффициентов). Поиск выполнялся в течение 80 000 циклов. Результат обработки, сигнал на выходе фильтра-корректора, показан на Рис.3В. Хорошо видно, что алгоритм справился с поставленной задачей. Задержка сигнала Рис.3В будет однозначно найдена методом перехода через ноль.

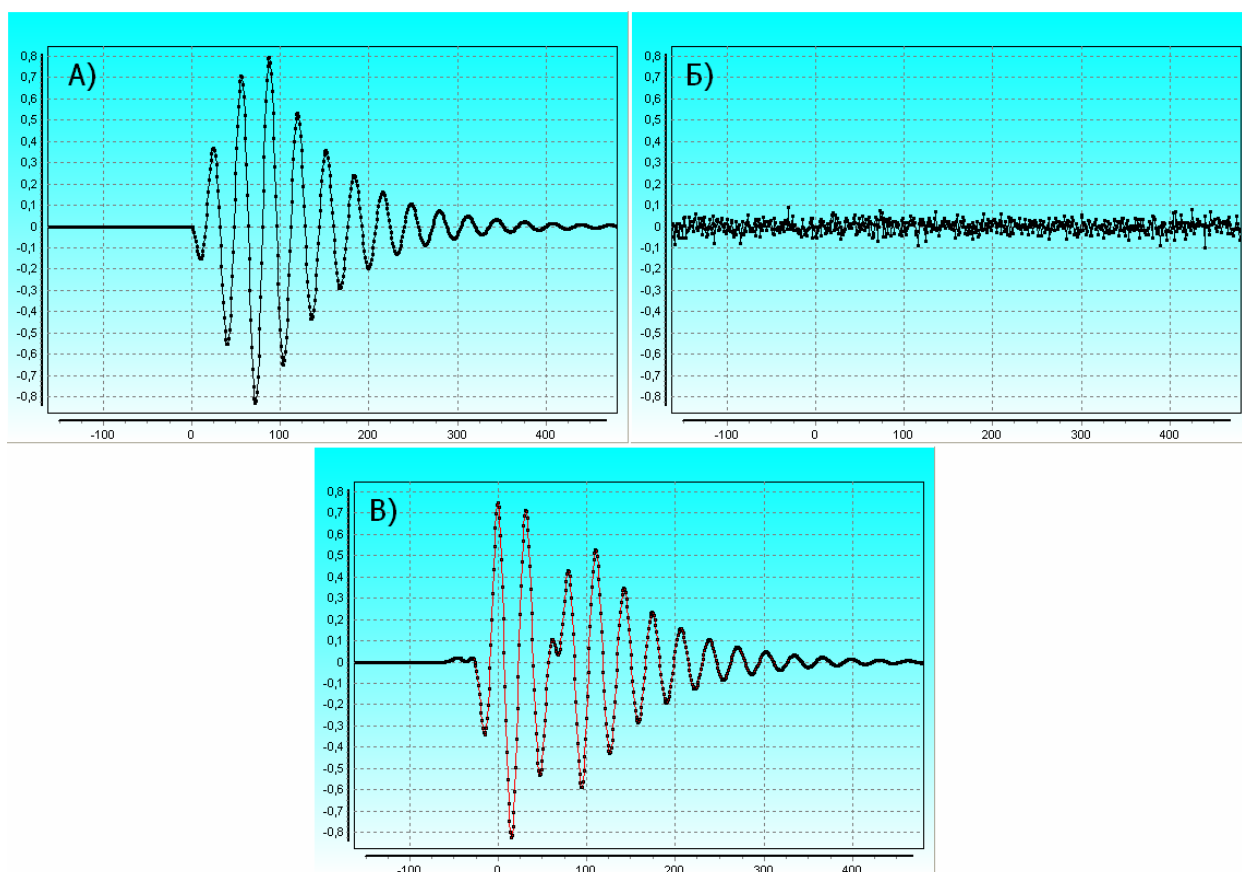


Рис.3. Задача коррекции переднего фронта ультразвукового сигнала.

А) Исходный ультразвуковой сигнал. Б) Шум.

В) Сигнал на выходе фильтра-корректора.

Характеристики фильтра-корректора показаны на Рис.4. В частности получен довольно короткий импульсный отклик (Рис.4А). Амплитудно- и фазо-частотные характеристики почти симметричны относительно несущей частоты ультразвукового импульса 2,5МГц. Амплитудно-частотная характеристика фильтра (Рис.4.Б) подавляет несущую частоту входного сигнала. В сущности, выходной сигнал фильтра определяется спектральными компонентами выше и ниже частоты 2,5 МГц.

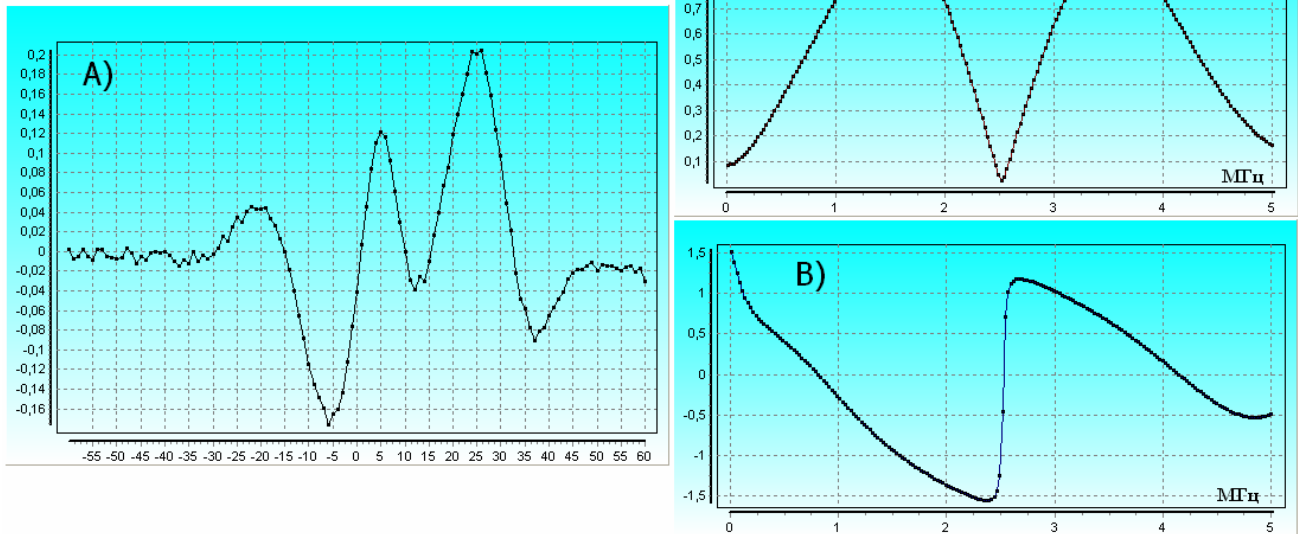


Рис.4. Параметры фильтра, найденного алгоритмом случайного поиска.

А) Коэффициенты фильтра, импульсная характеристика.

Б) Амплитудно-частотная характеристика.

В) Фазо-частотная характеристика.

Как известно, параметры ультразвуковых преобразователей немного меняются в процессе эксплуатации, в зависимости от температуры, из-за истирания рабочей поверхности и т.д. Естественное требование к фильтру – стабильность формы переднего фронта при небольших изменениях параметров ультразвукового импульса. Проверим, насколько устойчив результат обработки для данного класса фильтров.

Возьмем в качестве примера сигнал с несущей частотой 2,5МГц и с довольно длинным фронтом – 3 мкс (Рис.5А). Понятно, что метод перехода через ноль будет работать крайне нестабильно с таким сигналом. Далее с помощью поискового алгоритма был найден фильтр-корректор. При поиске использовался сигнал шума Рис.3Б. Характеристики полученного фильтра качественно совпадают с Рис.4. После фильтрации сигнал Рис.5А преобразуется к виду Рис.5Б. Теперь метод перехода через ноль даст однозначные измерения.

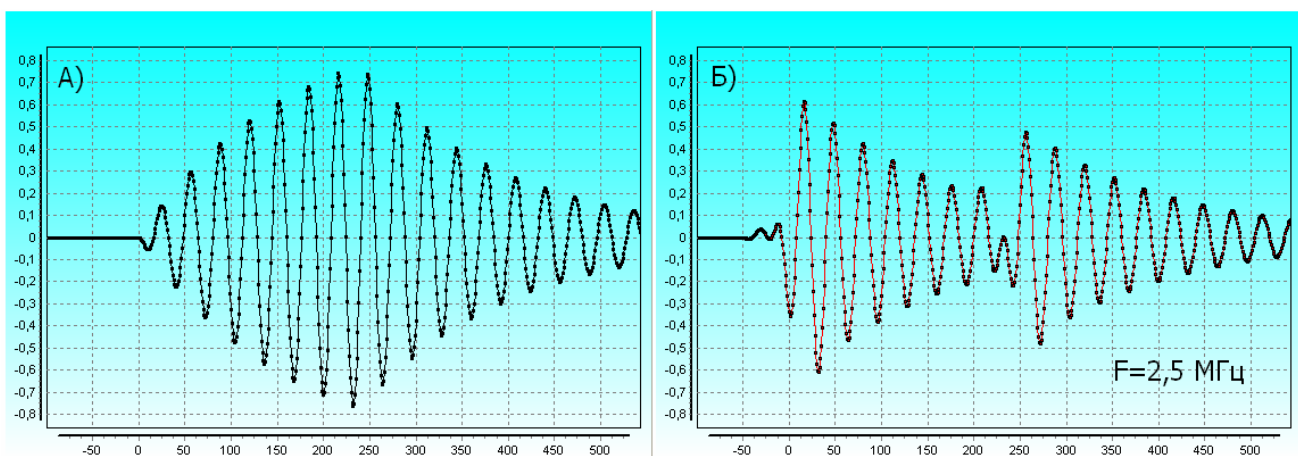


Рис.5. Образец ультразвукового импульса и результат фильтрации.

Далее исследовались реакции фильтра на ультразвуковые импульсы с близкими параметрами, варьировалась частота сигнала, фаза и постоянная времени нарастания. Численные эксперименты показали, что изменение фазы в пределах $\pm 50^\circ$ существенно не меняет форму переднего фронта. Постоянная времени нарастания ультразвукового импульса может меняться в широких пределах 1-8 мкс, при этом форма переднего фронта обработанного сигнала практически остается одинаковой. При увеличении постоянной времени нарастания входного сигнала снижается амплитуда выходного сигнала фильтра. Наибольшее влияние оказывает изменение частоты ультразвукового сигнала. На Рис.6. показаны реакции фильтра на ультразвуковые импульсы с частотами 2,3 и 2,7 МГц.

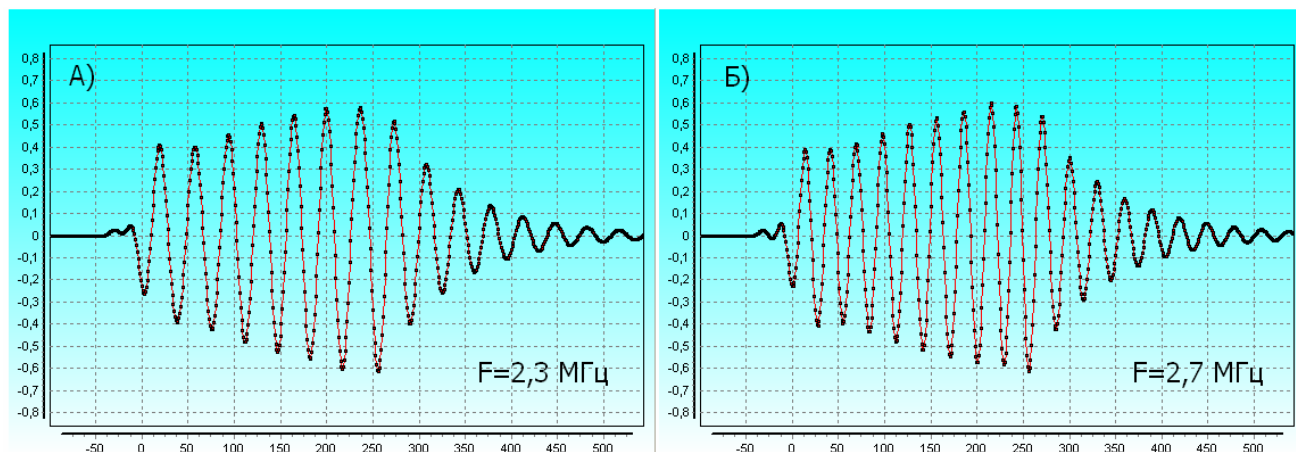


Рис.6. Изменение выходного сигнала фильтра при вариации несущей частоты входного ультразвукового импульса.

Таким образом установлено, что корректирующий фильтр обладает высокой устойчивостью к вариациям параметров входного сигнала. Он с успехом может быть использован для предварительной обработки импульсов в ультразвуковых толщиномерах или в акустических измерителях расстояния.

Данная технология корректировки ультразвуковых импульсов создана для нормирования сигналов датчиков, приведения сигналов к одинаковому виду. Хорошо известно, что преобразователи одного типа имеют технологический разброс параметров. Необходимо скомпенсировать эти отклонения. В ультразвуковой преобразователь можно установить микросхему памяти и записать в нее корректирующий фильтр. При подключении преобразователя к прибору коэффициенты фильтра считываются и в приборе производится предварительная фильтрация сигналов оптимальная для данного преобразователя. Тогда система преобразователь плюс фильтр обеспечит идеальную воспроизводимость ультразвуковых импульсов.

Литература

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Пер. с нем. – М: Металлургия, 1991г., 752с.
2. М.В.Королев, А.Е.Карпельсон Широкополосные ультразвуковые преобразователи. –М: Машиностроение, 1982г. 157с.
3. И.А.Глоzman Пьезокерамические материалы в электронной технике. –М: Изд. «Энергия», 1964г., 192с.
4. Р.Лайонс. Цифровая обработка сигналов. Второе издание. Пер. с англ. –М: ООО «Бином-Пресс», 2006г., 656с.
5. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики. Учеб. Пособие –М: Эко-Трендз, 2005г., 392с.