

РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ления: система слежения за солнцем и АСКУЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yurchenko, A.V. The long-term prediction of silicon solar batteries functioning for any geographical conditions / A.V. Yurchenko, A.V. Kozlov Proceedings of 22st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Milan 3-7 September 2007, pp.3019-3022.
2. Юрченко, А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натурных условиях г. Томска. // А.В. Юрченко, А.В. Козлов, В.К. Ковалевский. -Светотехника. 2005. – №1. – С. 37-41.
3. Юрченко, А.В. Статическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов. // А.В. Юрченко, А.В. Волгин, А.В. Козлов. - Известия ТПУ, 2009 - Т. 314, - № 4. - с. 142-148.
4. Юрченко, А.В. Фотоэлектрический датчик для систем слежения за Солнцем./ А.В. Юрченко, А.В. Волгин, М.В. Китаева, А.В. Охорзина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010 – с.36-37.
5. Юрченко, А.В. Мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей в натурных условиях. // А.В. Юрченко, А.В. Козлов. - Датчики и системы. 2006. – №9. – С. 64-67.
6. Юрченко, А.В. Влияние параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи.//А.В. Юрченко, Б.Д. Белан, А.В. Козлов, Д.А. Пестунов Оптика атмосферы и океана. 2005. – Т.18.- №8. – С. 731-734.

К.т.н., доцент Юрченко А.В., тел. 8-913-82-60-301, e-mail: niipr@inbox.ru; аспирант, Волгин А.В., студент, Китаева М.В., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра информационно - измерительной техники (г. Томск); к.т.н., с.н.с., Козлов А.В., Институт оптики атмосферы СО РАН (г. Томск).

УДК: 621.317.18

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОМЕТРОВ

Д.Е. Кривобоков

Рассмотрены схемы реализации измерительных преобразований в индукционных бесконтактных кондуктометрических приборах контроля штыревого типа. Выполнен анализ и представлены достоинства и недостатки измерительных схем, предложен компенсационный вариант измерительных преобразований.

Ключевые слова: кондуктометр, первичный измерительный преобразователь, компенсация, погрешность измерений, прибор контроля

Введение

Решение современных задач измерения параметров в технологическом процессе промышленных предприятий связано с необходимостью анализировать достаточно сложный объект контроля. Сложность связана с тем, что параметры, характеризующие объект, находятся в зависимости от нескольких величин, характеризующих как сам объект, так и условия, в которых он находится.

Всё это в полной мере относится к кондуктометрическим приборам контроля и измерительным установкам на их основе, использующимся для определения концентраций электролитов, как правило, в водных растворах.

Цель работы – рассмотреть способы уменьшения погрешности функциональных

преобразований сигналов с первичных измерительных преобразователей в выходные сигнал кондуктометрических концентратометров.

Известно, что удельная электрическая проводимость (УЭП) жидкости зависит от концентрации электролита и температуры. Поэтому, измерив УЭП и температуру, можно рассчитать и концентрацию электролита. Как правило, эта зависимость нелинейная и в некоторых случаях содержит экстремальные точки. Традиционный метод построения такой зависимости основан на применении кусочно-линейных функций, получаемых путём линейной аппроксимации экспериментальных данных в линейных, с точностью до требуемой погрешности, диапазонах измеряемых величин [1].

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОМЕРОВ

Наверное, единственным достоинством подобного метода реализации функциональной модели является достаточно простая алгоритмическая реализация, как процесса построения зависимости, так и процесса вычислений, а также теоретическая доступность.

Недостатки также очевидны, в частности:

- для построения кусочно-линейной модели с требуемой точностью, как правило, требуется большое количество точек, получаемых экспериментально, или с применением промежуточных методов аппроксимации делает метод трудоёмким;
- хранение всей «таблицы» интервалов модели требует достаточно больших ресурсов. Разумеется, для современных вычислительных систем подобное не составляет проблемы, однако приборы контроля нередко строятся на менее производительных вычислительных и запоминающих элементах в силу ряда причин, и не имеют достаточно большой объём памяти. Поэтому эту особенность можно рассматривать как недостаток;
- следующим достаточно существенным недостатком можно отметить отсутствие в составных элементах зависимости физических аналогий, отражающих физические явления, характеризующие объект измерений. В связи с чем, может возникнуть сложность при построении адаптивных средств измерений, от которых требуется изменять модель преобразований, основываясь на общих свойствах объекта измерений.

Однако, не смотря на недостатки, кусочно-линейная аппроксимация достаточно часто применяется в приборах контроля, в частности кондуктометрических. Связано это, скорее всего, с доступностью данного метода, как для разработчика, так и для пользователя. Таким образом, несмотря на потенциально высокую точность аппроксимации при помощи кусочно-линейного метода, на практике практически невозможно обеспечить достаточное количество данных, для того, чтобы получить зависимость с малой погрешностью преобразований, особенно для сильно нелинейных процессов. Препятствием тому являются «переломы» в точках аппроксимации.

Метод аппроксимаций [1, 2] с помощью степенных функций свободен от дискретности но также имеет ряд существенных недостатков с точки зрения обеспечения точности преобразований. Суть применения метода аппроксимации степенными полиномами экспериментальных данных, связывающих УЭП,

температуру жидкости и концентрацию электролита в следующем. Находим, к примеру, методом наименьших квадратов, значения коэффициентов степенных полиномов, реализующих функциональную связь между концентрацией раствора и УЭП при фиксированной температуре.

$$\begin{cases} C_{i0}(\chi) = k_{00} + k_{01} \cdot \chi^1 + \dots + k_{0n} \cdot \chi^n \\ C_{im}(\chi) = k_{m0} + k_{m1} \cdot \chi^1 + \dots + k_{mn} \cdot \chi^n \end{cases}, \quad (1)$$

где $C_{ti}(\chi)$ - значение концентрации при температуре t_i при данной электропроводности.

χ - значение УЭП жидкости;

k_{ij} - коэффициент полинома.

На втором этапе необходимо определить, при использовании, к примеру, того же метода наименьших квадратов, зависимость значений коэффициентов в семействе функций (1) при одинаковых показателях степени от температуры:

$$\begin{cases} k_0(t) = p_{00} + p_{01} \cdot t^1 + \dots + p_{0r} \cdot t^r \\ k_n(t) = p_{n0} + p_{n1} \cdot t^1 + \dots + p_{nr} \cdot t^r \end{cases} \quad (2)$$

где t – температура анализируемого раствора.

В результате функция для расчета концентрации по измеренным значениям УЭП и температуры будет иметь следующий вид:

$$C = \sum_{i=0}^n \left(\chi^i \cdot \sum_{j=0}^p k_{ij} \cdot t^j \right). \quad (3)$$

Максимальные значения показателей степеней n и p в функции (3) выбираются исходя из нелинейности зависимости и требуемой точности. Однако, очевидно, что с учетом этого условия, их значения должны быть минимально возможными. В противном случае, между точками аппроксимации поведение функции (3) может не соответствовать реальной зависимости. Собственно, это является основным недостатком данной модели. Поскольку, в точках аппроксимации погрешность, скорее всего, будет меньше требуемой, однако между точками, расхождения будут значительными и намного превышающими требуемый уровень. Следующий недостаток опять же связан с отсутствием какого-либо физического смысла коэффициентов

РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

полинома (3). Подтверждением может служить то, что при незначительном изменении аппроксимируемых данных значения коэффициентов (3) могут существенно измениться, но поведение зависимости (3) в целом, при этом, практически не меняется. Всё это опять же не способствует применению данных моделей в адаптивных СИ.

Однако, требуемое количество экспериментальных данных для получения модели (3) значительно меньше, чем для кусочно-линейного метода, но последний более предпочтительнее.

На рисунке 1 представлен пример функции преобразования (3), устанавливающей зависимость между концентрацией H_2SO_4 диапазоне от 92 до 96 % и измеренными значениями УЭП и температуры раствора, причём значения n и p равны 3. На рис. 1 видно, что аппроксимирующая функция практически точно совпадает с исходными экспериментальными данными, отмеченными ромбиками, по которым рассчитывались коэффициенты, однако ведёт себя неадекватно между ними. Очевидно, что в условиях ограниченного количества информации подобное поведение функции преобразования недопустимо.

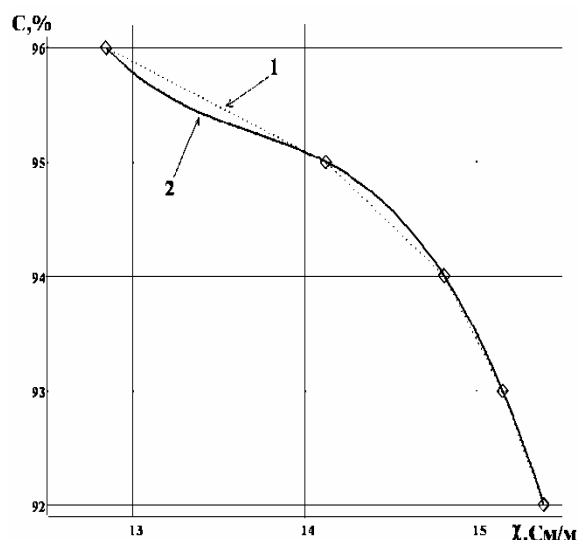


Рисунок 1 Поведение аппроксимирующей функции между точками аппроксимации. Условные обозначения: 1 — кривая, построенная по экспериментальным точкам; 2 — кривая аппроксимирующей функции, полученная для точек, отмеченных на рисунке ромбиками.

Тем не менее, простейшим способом уменьшения погрешности преобразования с помощью функции (3) является применение предварительной обработки аппроксимируемых данных. Основные действия, в этом слу-

чае, должны быть направлены на линеаризацию зависимости путём применения дополнительной функциональной обработки, а также исключение больших начальных смещений зависимости относительно нулевых значений — начала координат.

Но более эффективным способом уменьшения погрешности измерительных преобразований является организация вычислений с учётом причинно-следственных связей, а именно представить зависимость УЭП как функцию от концентрации и температуры:

$$\chi = \sum_{i=0}^n \left(C^i \cdot \sum_{j=0}^p p_{i,j} \cdot t^j \right). \quad (4)$$

Весь процесс получения коэффициентов p аналогичен модели (3), разница только в том, что в системе (1) меняются местами C и G , то есть находится зависимость УЭП от концентрации при фиксированной температуре жидкости.

Интересующим параметром является концентрация электролита, поэтому в приборе контроля необходимо реализовать алгоритм поиска C при измеренных значениях G и T , что не является технически сложным.

На рисунке 2 представлены зависимости моделей (3) и (4), полученных для одних и тех же исходных данных концентрации серной кислоты (H_2SO_4) в диапазоне от 92 до 96 % массовой концентрации с интерполяцией на диапазон от 96 до 99 %.

Очевидно, что модель (4) при более низких показателях степени имеет меньшую погрешность как в диапазоне аппроксимаций, так и в диапазоне интерполяций.

Но, несмотря на все достоинства, коэффициенты полинома зависимости (4) всё также физически безлики, что опять же затрудняет реализацию механизма адаптивного их изменения.

Адаптация функций преобразования необходима для уменьшения результирующей погрешности измерений, обусловленной отливом условий технологического процесса по сравнению с первоначальными, на которые выполнялась настройка прибора. Причиной тому, применительно к кондуктометрическим приборам, могут служить как присутствие электропроводящих примесей, так и изменение условий взаимодействия датчика с объектом измерений, в частности влияние внешних элементов конструкции, загрязнение электродов и т.д.

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОМЕРОВ

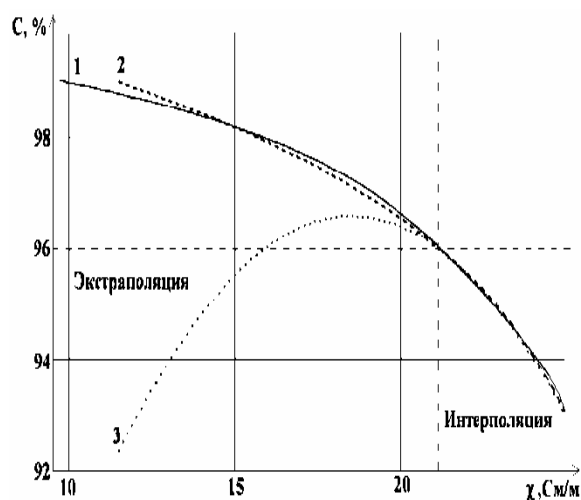


Рисунок 2 – Поведение функций преобразования значения УЭП жидкости в значение концентрации серной кислоты при температуре 55°C. Условные обозначения: 1 – кривая зависимости, построенная по экспериментальным точкам; 2 – кривая, построенная при помощи функции (4), полученной для диапазона концентраций от 93 до 96 % серной кислоты и экстраполированной на диапазон концентраций от 96 до 99 %; 3 – кривая, построенная при помощи функции (3), полученной для диапазона концентраций от 93 до 96 % серной кислоты и экстраполированной на диапазон концентраций от 96 до 99 %.

Собственно сама проблема адаптации функции преобразования кондуктометрических концентратометров возникла перед автором при разработке многопараметрической измерительной установки, которая предназначена для определения концентрации двух электролитов в водном растворе по измеренным значениям УЭП, плотности и температуры жидкости. Поскольку условия технологического процесса, в том числе и влияние примесей, в лаборатории воспроизводить достаточно сложно. И если в случае измерения концентрации одного электролита корректировку показаний в промышленных условиях выполнить достаточно просто, то при измерении нескольких параметров возникает неопределенность относительно места приложения регулировок.

Понятно, что модели в виде полиномов хоть и способны обеспечить требуемую точность, но абсолютно непригодны к "подстройкам". Поскольку еще одним важным моментом является то, что количество независимых экспериментальных точек, по которым необходимо выполнить корректировку, ограничено единицами, в лучшем случае десятками. Большой объем в условиях технологического цикла собрать сложно, а иногда и просто невозможно. При решении подобной задачи, у

данных моделей есть еще один существенный недостаток – количество коэффициентов, составляющих модель, стремительно растет, что делает ее очень неудобной в применении.

Поэтому была разработана модель зависимости УЭП от концентраций, основанная на "видимой" физической зависимости, существующей в растворе электролитов.

Общий вид зависимости представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \chi_1(C_1, t) &= C_1 \cdot (k_{00} + k_{01} \cdot t + k_{02} \cdot t \cdot C_1) \cdot e^{-(k_{03} + k_{04} \cdot t + k_{05} \cdot t \cdot C_1)} \\ \chi_2(C_2, t) &= C_2 \cdot (k_{10} + k_{11} \cdot t + k_{12} \cdot t \cdot C_1) \cdot e^{-(k_{13} + k_{14} \cdot t + k_{15} \cdot t \cdot C_1)} \\ \chi_{св}(C_1, t) &= C_1 \cdot C_2 \cdot (k_{00} + k_{01} \cdot t + k_{02} \cdot t \cdot C_1 \cdot C_2) \times \\ &\times e^{-(k_{03} + k_{04} \cdot t + k_{05} \cdot t \cdot C_1 \cdot C_2)} \\ \chi_{рств} &= k_{30} + k_{31} \cdot t \end{aligned} \quad (5)$$

где C_1, C_2 – концентрации электролитов; χ_1, χ_2 – УЭП раствора, обусловленная только соответствующим электролитом;

$\chi_{св}$ – УЭП раствора, обусловленная взаимным влиянием двух электролитов между собой;

$\chi_{рств}$ – УЭП растворителя;

k – коэффициенты.

Полная УЭП раствора выражается как:

$$\chi_{сум}(C_1, C_2, T) = \chi_1(C_1, T) + \chi_2(C_2, T) + \chi_{св}(C_1, T) + \chi_{рств}(C_1, T) \quad (6)$$

Причем первые две составляющие выражения (6) устанавливают зависимость УЭП для раствора одного соответствующего электролита в жидкости от его концентрации и температуры. Третья составляющая определяет вносимую УЭП, обусловленную взаимодействием электролитов, также с учетом температурной зависимости, и четвертое уравнение соответствует температурному свойству растворителя.

В основу первых трех уравнений системы (6) положена достаточно простая зависимость, определяющая УЭП раствора электролита:

$$g \sim C \cdot \mu(C, T), \quad (7)$$

где C – концентрация электролита; μ – подвижность ионов в растворе.

Поэтому выражение в скобках (5) определяет зависимость подвижности от соответствующих параметров. Экспоненциальная зависимость введена для расширения нели-

РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

нейных свойств и определяет опять же характер подвижности.

Очевидно, что модель (5) и (6) не отражает точно процессы переноса электричества в жидкости, однако её составляющие имеют свой определенный физический смысл. Это, в частности, позволило легко и надёжно определять коэффициенты. Изначально, "обучение", или определение коэффициентов, модели производилось методом подбора. Причем, в начале определялись коэффициенты первых двух уравнений (5) при использовании соответствующих экспериментальных данных для водных растворов, только лишь одного, соответствующего электролита. Далее все уравнения зависимости (5) "обучались" на экспериментальных данных для водного раствора двух электролитов. Кроме того, как показала практика применения подобных моделей, каждый коэффициент должен иметь собственные характеризующие его показатели. Эти показатели определяют направление и степень воздействия на коэффициент в зависимости от текущего состояния модели по отношению к экспериментальным данным. Иными словами, коэффициенты перестают быть безликими и становятся "компетентными" участниками всего ансамбля модели. Целью подобной «нагрузки» коэффициентов является установление связей и взаимодействия между ними, а также наполнение физическим смыслом.

Всё это позволило достаточно эффективно внедрить механизмы самоорганизации, способствующие адаптации всей модели по ограниченному количеству экспериментальных данных при изменении поведения или свойств объекта измерений.

В результате, модель, представляющая собой семейство уравнений (6) и содержащая в своем составе 20 коэффициентов позволяет рассчитывать значения концентраций с погрешностью в несколько раз меньшей, чем аналогичные модели в виде полиномов (4), содержащие около сотни коэффициентов. К примеру, в технологическом процессе получения меди электролизным методом необходимо непрерывно контролировать концентрацию серной кислоты (H_2SO_4) в диапазоне от 50 до 200 г/л и концентрацию сульфата меди ($CuSO_4$) в диапазоне от 10 до 300 г/л, при этом температура раствора может меняться от 20 до 70°C. Моделирующая функция зависимости УЭП раствора от концентраций электролитов и температуры, построенная на основе степенных полиномов (4), содержит 48 коэффициентов и обладает

средней относительной погрешностью 0.5%. Аналогичная модель, в виде зависимости (6), характеризуется 20 коэффициентами и выполняет преобразования с погрешностью около 0.2%, что соответствует погрешности лабораторных приборов, с помощью которых получены первичные данные.

Кроме того, как показала практика применения, для корректировки результата в представленном примере для модели (6) достаточно от нескольких до десятка экспериментальных точек, при том, что зависимости в виде полинома или кусочно - линейные зависимости вообще не в состоянии адекватно подстроиться.

В настоящее время ведутся разработки механизмов самоорганизации, позволяющих реализовать полностью адаптивные функциональные преобразователи, способные самостоятельно отображать свойства измеряемого объекта и изменять передаточную характеристику в условиях ограниченного количества информации.

Выводы

Кусочно-линейные функции преобразования могут применяться для построения, в том числе и сильно нелинейных зависимостей, достаточно просты в алгоритмической реализации и «теоретически» доступны, однако, для обеспечения высокой точности преобразований требуют больших вычислительных ресурсов применительно к приборам контроля, и кроме того, не позволяют в полной мере реализовать адаптивные средства измерений.

Зависимости в виде степенных полиномов удобны для использования в приборах контроля, в частности кондуктометрических, для построения зависимостей не более чем от двух переменных. Однако требуют корректного установления причинно - следственных связей при аппроксимации и тщательного контроля поведения функции между аппроксимируемыми точками, особенно при высоких показателях степеней для сильно нелинейных зависимостей, к примеру для растворов H_2SO_4 в диапазоне концентраций от 92 до 99 %, SO_3 в диапазоне концентраций от 15 до 28 %. Вместе с тем, также плохо пригодны для создания адаптивных приборов, поскольку коэффициенты зависимостей безлики в физическом смысле.

Для случая, когда необходимо построить зависимости от трёх и более переменных, с лучшей стороны показали себя конструкции из функциональных элементов, связанных между собой определённым физическим

смыслом, соответствующим природе моделируемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амасов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие [Текст]/ А.А. Амасов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копчёнова. – М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.: ил.

2. Чекушкин, В.В. Реализация вычислительных процессов в информационно-измерительных системах: монография [Текст] В.В. Чекушкин, О.В. Юрин, В.В. Булкин – Муром: МИ ВлГУ, 2005. – 158 с.: ил.

к.т.н., доц. Кривобок Д.Е., тел. (3852) 26-04-92, krivobok@ab.ru - Алтайский гостехуниверситет.

УДК 004.415.2.041

ТРИАНГУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И. Тищенко

В статье изучается возможность создания системы определения координат источника звука. Предложена функциональная схема прибора и метод вычисления координат. На практике проверена работоспособность с помощью пробного образца. Опытным путем исследовалось влияние количества датчиков на точность результатов.

Ключевые слова: координата, источник звука, микрофон

Довольно часто человек сталкивается с задачей определения местоположения различных объектов. Если не учитывать собственные возможности человека, то можно назвать ряд методов для этих целей: радиолокация, оптическая, звуковая и тепловая локация. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками.

Далее будем рассматривать случай, когда объект имеет маленькие размеры, по сравнению с размерами области своего расположения. Кроме того, этот объект является источником звука. Логично предположить, что наилучшим образом с такой задачей справится метод звуковой локации. Звуковая локация бывает активная и пассивная [1]. В нашем случае мы имеем дело с пассивной, так как объект сам является источником звуковых волн, которые могут регистрироваться микрофонами. Будем считать, что микрофоны закреплены в базовых точках с известными координатами, и излучаемый объектом звук может регистрироваться хотя бы частью микрофонов. Поскольку звуку до каждого из микрофонов приходится проходить разные расстояния, то возникают задержки, величину которых и необходимо измерить. В случае импульсного излучения звука объектом может фиксироваться время прихода импульса на разные микрофоны, в случае непрерывного излучения некогерентного звука могут использоваться корреляционные методы определения задержки сигналов.

Обычной проблемой при измерениях являются шумы, помехи при низком уровне полезного сигнала, из-за этого задача определения координат объекта может стать неустойчивой. Поэтому дополнительным требованием к разрабатываемому методу определения координат является возможность использования в расчетах всех микрофонов, принимающих различимый сигнал, для повышения точности определения координат.

Нашей задачей является разработка макета прибора для определения координат излучающих звук объектов. С этой целью разрабатывались модель процесса измерений, методы определения координат, а также макет измерительной системы на базе микроконтроллеров. В качестве требований к разрабатываемому устройству были выделены простота реализации, удобство использования, а также доступность для широкого применения в заданных условиях измерений. Выполнить эти требования в большей степени стало возможно за счет прогресса в параметрах современных микроконтроллеров, которые являются сейчас дешевой и доступной вычислительной системой.

В качестве датчиков вполне можно использовать обычные микрофоны (мк). Микрофоны преобразуют акустический сигнал в электрический [2], который поступает в блок предварительного усилителя (ПУ). Затем сигнал подается в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), встроенный в микроконтроллер. Результаты работы АЦП обрабатывают-