

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ
РАСХОДА ТЯЖЕЛОГО ТОПЛИВА ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вопросы комплексной автоматизации технологических процессов судовых энергетических систем на современном этапе развития морского флота являются основными с точки зрения обеспечения судов высокоэффективными энергетическими установками, отвечающими требованиям наибольшей экономичности и экологической чистоты. Обязательными компонентами судовых энергетических установок являются первичные измерительные преобразователи. В последнее время [1, 2] в судовых автоматизированных системах нашли применение пьезоэлектрические датчики давления и расхода различных жидких сред, в том числе и тяжелого топлива главного двигателя (ГД).

Такие свойства пьезокерамических элементов, как высокая надежность, прочность, устойчивость к действию магнитных и радиационных излучений, химическая нейтральность, определяют целесообразность их использования в судостроительной промышленности. Однако, наряду с этими положительными качествами, пьезоэлементы обладают существенными нелинейными характеристиками, связанными с пьезоэлектрическим гистерезисом, остаточной деформацией, зависимостью параметров пьезоэлементов от термодинамических свойств потоков жидкости. До настоящего времени в таких датчиках не реализованы в полной мере функции коррекции статических и динамических погрешностей измерений давления, в том числе вызванных изменениями термодинамических параметров среды [3]. Современная микроконтроллерная техника обеспечивает введение алгоритмов динамической коррекции.

Одним из вариантов конструкций пьезокерамических элементов, предназначенных для использования в приборостроении и автоматике, является биморфный пьезоэлектрический элемент (БПЭ) [4].

В связи с изложенным предлагается пьезоэлектрический преобразователь давления, который позволяет определить скорость потока, а, следовательно, и расход тяжелого топлива, по величине гидродинамического давления, оказываемого жидкой средой на него. БПЭ, работая в трансформаторном режиме, помещается непосредственно в поток, а амплитуда напряжения U_2 , пропорциональная гидродинамическому давлению является информативным параметром преобразователя (рис. 1).

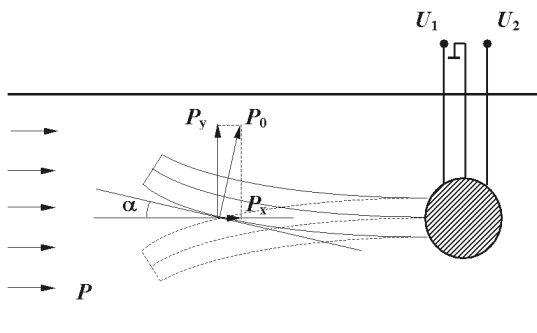


Рис.1. Влияние гидродинамического давления на БПЭ расходомера

Основными источниками погрешностей измерений расхода жидкостей являются изменения физико-химических параметров контролируемой среды (температура, плотность, вязкость). Так, в работе [5] было предложено несколько решений, позволяющих повысить достоверность измерений расхода.

На рис. 2 представлена структурная схема расходомера с температурной коррекцией параметров жидкостных потоков.

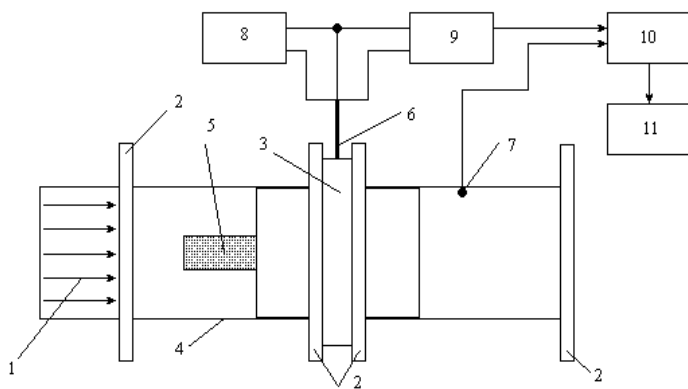


Рис. 2. Пьезоэлектрический расходомер с температурной коррекцией: 1 – поток жидкости; 2 – фланцы; 3 – резиновая прокладка; 4 – корпус; 5 – биморфный пьезоэлемент; 6 – держатель БПЭ; 7 – термодатчик; 8 – генератор; 9 – усилитель; 10 – микропроцессорное устройство обработки информации; 11 – устройство отображения

Расходомер встраивается в технологический трубопровод, поток жидкости взаимодействует с колеблющимся БПЭ. Амплитуда трансформируемого электрического напряжения является мерой гидродинамического давления жидкости. Информативный сигнал, после предварительного усиления, поступает на микропроцессорное устройство, где обрабатывается по определенному алгоритму, в котором предусмотрена коррекция температурной погрешности путем внесения соответствующей поправки в результаты измерений на основе базы данных об изменениях амплитуды сигнала БПЭ. Измерительные погрешности пьезоэлектрического расходомера заметно снижаются в том случае, если разместить два БПЭ в одной плоскости, например в вертикальной, вдоль потока в трубопроводе (рис. 3) [6]. Поскольку амплитуда колебаний зависит от направления обтекания средой колеблющегося БПЭ, то выходной сигнал первого БПЭ будет увеличиваться, а второго – уменьшаться. При подаче выходных сигналов на дифференциальный усилитель, влияние температуры среды на показания расходомера уменьшаются. Кроме того, изменения плотности и динамической вязкости жидкой среды оказывают одинаковое влияние на параметры колебаний двух БПЭ, что также повышает точность измерения расходов.

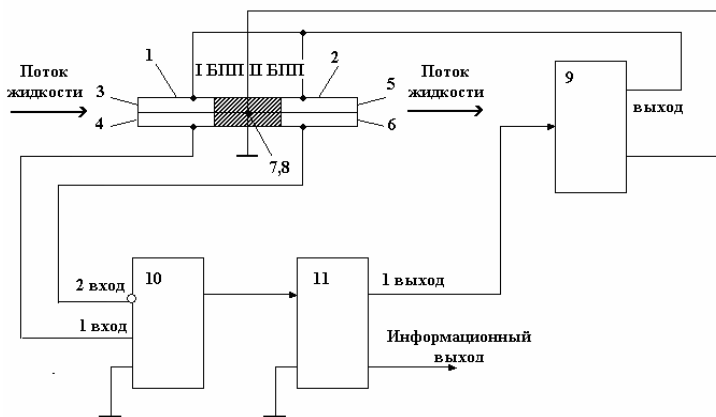


Рис. 3. Пьезоэлектронный расходомер жидких сред с двумя БПЭ: 1 – первый биморфный пьезоэлемент; 2 – второй биморфный пьезоэлемент; 3 – первичный пьезоэлемент первого БПП; 4 – вторичный пьезоэлемент первого БПП; 5 – первичный пьезоэлемент второго БПП; 6 – вторичный пьезоэлемент второго БПП; 7, 8 – общий электрический вывод биморфных пьезоэлементов; 9 – генератор; 10 – дифференциальный усилитель; 11 – устройство усиления обработки и регистрации информации

В случае неоднородного поля скоростей потока два БПЭ следует размещать в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [7]. Так на рис. 4 приведена структурная схема подобного расходомера.

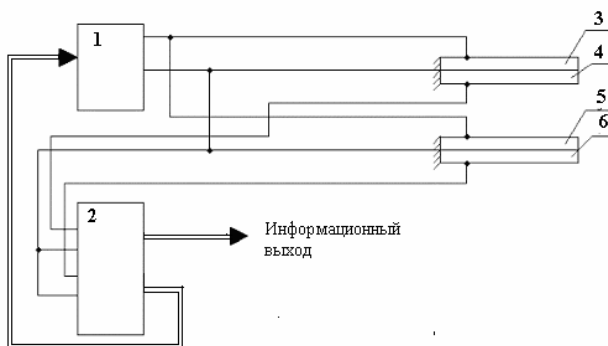


Рис. 4. Пьезоэлектронный расходомер жидких сред: 1 – генератор; 2 – устройство усиления, обработки и регистрации информации; 3 – первичный пьезоэлемент первого БПП; 4 – вторичный пьезоэлемент первого БПП; 5 – первичный пьезоэлемент второго БПП; 6 – вторичный пьезоэлемент второго БПП

Компенсация нелинейностей измерений в вышеизложенных способах осуществляется за счет дополнительных технических решений.

Одним из возможных способов линеаризации замкнутого контура регулирования расхода тяжелого топлива, использующего пьезоэлектрические первичные преобразователи, является введение в контур управления нелинейной зависимости, компенсирующей исходную нелинейность. Для решения такой задачи требуется микропроцессорная аппроксимация градуировочных характеристик (ГХ), основанная на построении модели, описывающей соотношение «вход-выход» измерительного преобразователя [8].

В качестве исходных данных для аппроксимации ГХ используются экспериментально полученные зависимости $U = f(P)$ пьезопреобразователя в виде равнобедренной трапеции с основанием 15 мм и высотой 20 мм для частоты 619 Гц (табл.).

Таблица

Экспериментальные данные для построения ГХ

Напряжение U , мВ	228	235	238	244	252	251	254
Давление p , Па	0	143,6	237	323	408,8	531,2	724,9

Наиболее простым способом аппроксимации данных, является аппроксимация, при которой значение в каждой промежуточной точке принимается равным ближайшему значению, заданному в таблице (аппроксимация по соседним элементам). Линейная аппроксимация приводит к соединению соседних точек отрезками прямых согласно соответствующих табличным данным [9]. Как видно из рис. 5, оба способа аппроксимаций дают очень приближенные результаты.

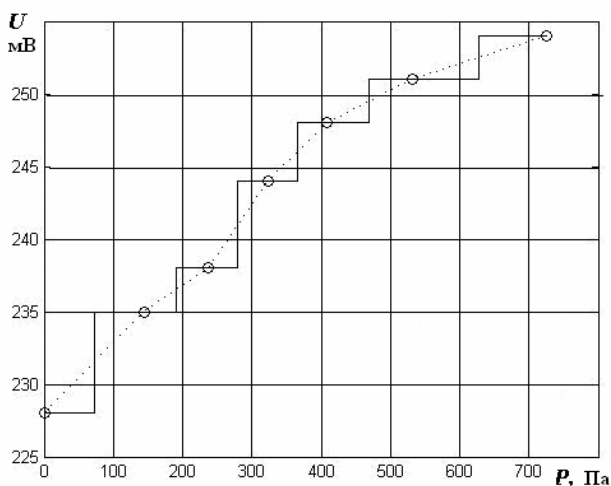


Рис. 5. Линейная аппроксимация ГХ: \circ - экспериментальные данные; - - - - - линейная аппроксимация; — — — — — аппроксимация по средним точкам

Традиционно для аппроксимации нелинейных зависимостей такого типа используется приближение методом наименьших квадратов [9]. На рис. 6 представлен результат аппроксимации полиномами второй, четвертой и пятой степенями.

Проведенная аппроксимация показывает, что приближение методом наименьших квадратов не всегда дает хороший результат. Кроме того, при увеличении степени полинома возможно ухудшение приближения (происходит при n , равном пяти).

Обычно при аппроксимации таблично заданной функции для получения плавного перехода от одного значения к другому применяют сплайны [9]. Результат сплайн-аппроксимации показан на рис. 7.

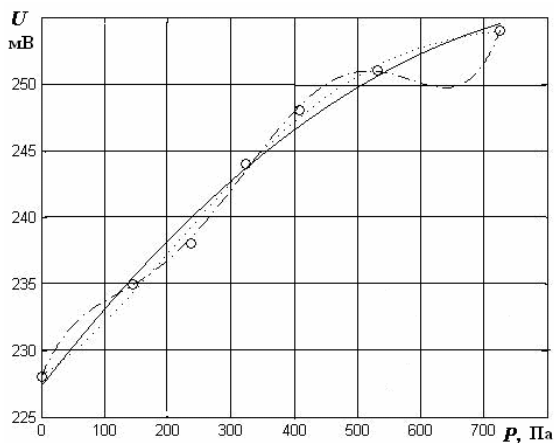


Рис. 6. Полиномиальная аппроксимация ГХ: \circ - экспериментальные данные; - - - - - аппроксимация полиномом пятой степени; - - - - - аппроксимация полиномом четвертой степени; ———— аппроксимация полиномом второй степени

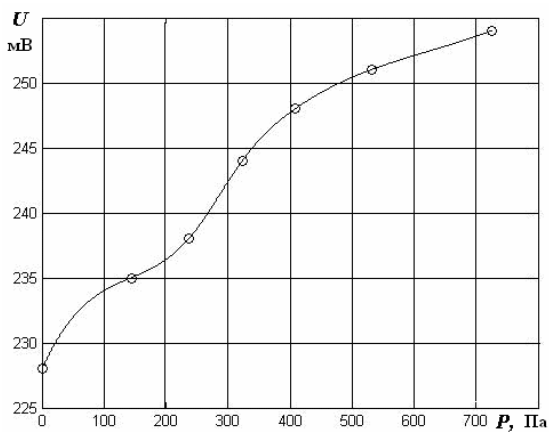


Рис. 7. Сплайн-аппроксимация ГХ:
 \circ - экспериментальные данные; ———— - сплайн-аппроксимация

В исследовании применен нейросетевой метод аппроксимации ГХ пьезоэлектрических датчиков давления тяжелого топлива ГД, ранее не использовавшийся для решения подобных задач в метрологическом обеспечении. Выбор данного метода основан на том, что любую

функцию многих переменных можно представить двухслойной нейронной сетью с прямыми связями с n нейронами входного слоя, $N=2n+1$ нейронами скрытого слоя, m нейронами выходного слоя и заранее заданными функциями активации f , функции активации должны быть непрерывными и дифференцируемыми в области определения [10].

Для решения поставленной задачи был построен многослойный перцептрон (рис. 8) с прямыми связями и одним скрытым слоем типа $(2-N-1)$.

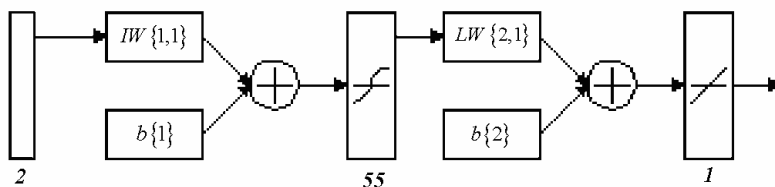


Рис. 8. Архитектура многослойного перцептрона

Функцией активации нейронов скрытого слоя выбран гиперболический тангенс, а выходного нейрона – линейная функция без смещения:

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1;$$

$$\text{purelin}(n) = n.$$

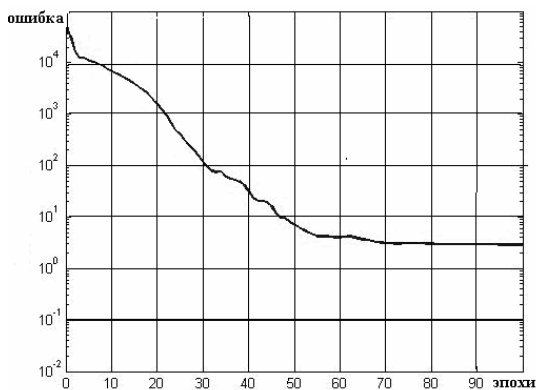
Обучение перцептрона проводилось при помощи алгоритма градиентного спуска и алгоритма Левенберга-Марквардта (рис. 9).

В результате моделирования было установлено, что оба алгоритма обеспечивают стабильное снижение заданной ошибки аппроксимации, но последний алгоритм является более быстродействующим.

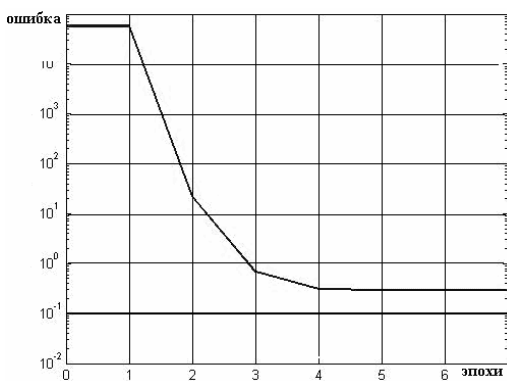
Количество нейронов скрытого слоя подбиралось экспериментально и зависело от размерности входного вектора и степени нелинейности ГХ датчика. Наилучшие результаты получены при количестве нейронов в скрытом слое 55 (алгоритм обучения GDX) и 40 (алгоритм обучения LM).

Результат нейросетевой аппроксимации показан на рис. 10.

Статистическая оценка среднеквадратической погрешности рассмотренных методов: линейная – 5,18; полиномиальная – 1,61; сплайн – 0,96; нейросетевая – 0,24.



а)



б)

Рис. 9. Графики обучения многослойного перцептрона: а - обучение по алгоритму градиентного спуска (GD), б – обучение по алгоритму Левенберга-Марквардта (LM)

Анализ численных значений погрешности показал, что нейросетевой метод обеспечивает значительное повышение точности аппроксимации ГХ пьезоэлектрического датчика давления тяжелого топлива ГД.

Таким образом, комплексное применение программно-аппаратных методов позволяет проводить динамическую коррекцию погрешности измерений расхода тяжелого топлива главного двигателя. Наиболее перспективным является нейросетевой метод, технически реализуемый на нейропроцессоре Л1879ВМ1 (NeuroMatrix NM6403) со встроенными алгоритмами обучения и моделирования.

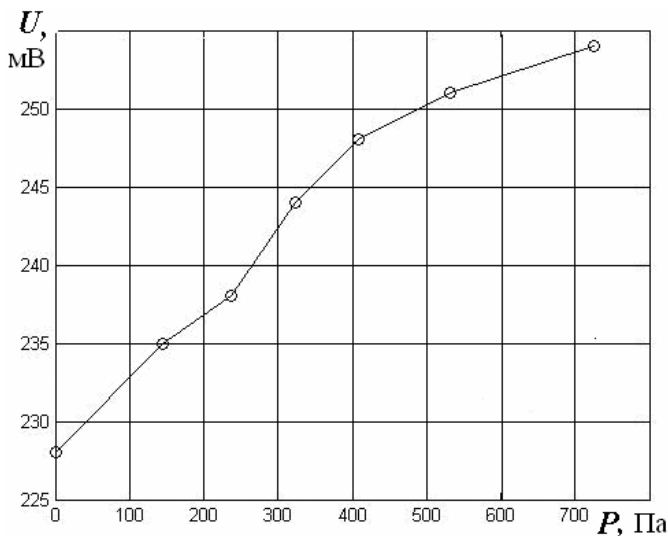


Рис. 10. Нейросетевая аппроксимация ГХ:
 о - экспериментальные данные; ———— - нейросетевая аппроксимация

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толшин В.И., Сизых В.А. Автоматизация судовых энергетических установок. учебник. – М.: РосКонсульт. – 2003. – 304 с.
2. Беляев И.Г., Курзенков Н.Г., Седых В.И., Слесаренко В.Н. Автоматизация процессов в судовой энергетике: учебник для вузов. – Владивосток. – 1999. – 453 с.
3. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник. – СПб: Политехника, 1994. – 608 с.
4. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезокерамические преобразователи физических величин /Под ред. В.М. Шарапова. - Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 631 с.
5. Глазева О.В. Белокопытный А.С., Плавинский Е.Б. Пьезоэлектронный расходомер газовых потоков // Холодильная техника и технология – 2000. – Вып. 68. – С. 65 - 66.
6. Пат. 34149А Україна, МПК7 G 01 F 3/12 П'єзоелектронний витратомір рідких та газоподібних середовищ / Глазева О.В., Плавинський Є.Б.; ОДПУ – № 99063164. Заявл. 09.06.1999. Опубл.

15.02.2001.

7. Пат. 41109А Україна, МПК7 G 01 F 3/12 П'єзоелектронний витратомір рідких та газоподібних середовищ / Глазева О.В., Плавинський Є.Б.; ОДПУ – № 2001020966. Заявл. 13.02.2001. Опубл. 15.08.2001.

8. Глазева О.В., Плавинский Е.Б. Моделирование функции преобразования пьезоэлектрических датчиков гидродинамических давлений // Холодильна техніка і технологія. – 1999. – №61. – С. 17 - 20.

9. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2002. – 768 с.

10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание. Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. - 1104 с.