

ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ

А.П. Лапин, А.М. Дружков

Представлена методика поиска двухфакторной математической модели функции преобразования вихреакустического расходомера по результатам специальных испытаний. В соответствии с предложенной моделью результирующий расход зависит от частоты образования вихрей за телом обтекания и температуры измеряемой среды. Выбор модели выполнен с помощью метода всех возможных регрессий, расчет коэффициентов производился по взвешенному методу наименьших квадратов.

Предложен способ адаптации найденной двухфакторной функции преобразования для использования ее при серийном производстве расходомеров. Приведены результаты применения предлагаемой функции на примере данных с серийного производства вихреакустических расходомеров.

Ключевые слова: вихреакустические расходомеры, функция преобразования, взвешенный метод наименьших квадратов, метод всех возможных регрессий.

Введение

Большое число исследований вихревых расходомеров направлено на увеличение диапазона, а также точности измерений [1–4]. У вихревых расходомеров с ультразвуковым детектированием вихрей (вихреакустические расходомеры) чувствительность значительно выше, чем у традиционных вихревых расходомеров [5], поэтому возможно увеличение диапазона измерений в сторону малых расходов. Однако на малых расходах линейность функции преобразования (ФП), описанной в работе [6], нарушается. Для повышения точности измерения на малых расходах, необходимо учитывать особенности течения жидкости в проточной части расходомера при малых скоростях потока.

1. Постановка задачи

В работе [7] на основе данных с серийного производства вихреакустических расходомеров были исследованы простые однофакторные модели функции преобразования $Q(f)$, зависящие от частоты вихреобразования f за телом обтекания. Была доказана необходимость включения в функцию преобразования статистически значимого фактора – температуры измеряемой среды.

При серийном выпуске продукции испытания проводятся при постоянной (стендовой) температуре измеряемой среды. Для построения модели двухфакторной функции преобразования $Q(f, t)$, где результирующий расход Q зависит от частоты срыва вихрей f и от температуры измеряемой среды t , необходимо иметь сведения об испытаниях расходомеров при различных температурах измеряемой среды. Для этого была составлена специальная методика испытаний и проведены опыты на специальной расходомерной установке, позволяющей осуществлять нагрев измеряемой среды (водопроводная вода по ГОСТ 2874–82).

По результатам испытаний был получен набор данных о различных режимах расхода при определенных температурах измеряемой среды. На основе полученных экспериментальных данных проведены исследования двухфакторной модели.

2. Экспериментальные данные

Летом 2012 года были проведены специальные эксперименты на установке для поверки счетчиков жидкости УПСЖ 15/50. Технические особенности используемой установки дают возможность нагрева измеряемой среды в широком диапазоне температур, но не позволяют осуществить ее охлаждение. Всего испытаниям подверглись девять образцов одной марки вихреакустических расходомеров двух различных диаметров условного прохода (D_u): 25 мм, 32 мм. Эксперименты проводились при семи различных значениях температуры измеряемой среды: от 30 до 90 °С,

с шагом в 10 °С (табл. 1). Точность установки температуры измеряемой среды ± 3 °С. На каждой из температур проводились измерения на 9 режимах расхода. Данные, полученные в результате испытаний, были разделены на две группы. Часть результатов испытаний была использована для построения модели функции преобразования (градуировка), а другая часть данных – для проверки (верификация) качества построенной модели ФП.

Таблица 1

Разбиение экспериментальных данных

Температура, °С	Ду 25	Ду 32
30	Градуировка	Градуировка
40	Верификация	Верификация
50	Градуировка	Градуировка
60	Верификация	Верификация
70	Градуировка	Градуировка
80	Верификация	Верификация
90	Градуировка	Градуировка

В результате проведенных испытаний был получен массив информации, необходимый для исследования двухфакторной модели функции преобразования $Q(f, t)$. Структура массива представлена в табл. 2.

Таблица 2

Структура массива данных для исследования двухфакторной функции преобразования

Температура измеряемой среды, °С	Частота вихреобразования, Гц	Расход измеряемой среды, м ³ /ч
t_{30}	$f_{30,1}$	$Q_{30,1}$
	$f_{30,2}$	$Q_{30,2}$

	$f_{30,9}$	$Q_{30,9}$
...
t_{90}	$f_{90,1}$	$Q_{90,1}$
	$f_{90,2}$	$Q_{90,2}$

	$f_{90,9}$	$Q_{90,9}$

3. Выбор вида математической модели двухфакторной функции преобразования

Для поиска двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров был использован метод всех возможных регрессий [8]. В качестве *полной* модели выбрана полиномиальная двухфакторная модель вида (1) с максимальными показателями степени равными 3, как по частоте образования вихрей (f), так и температуре измеряемой среды (t)

$$Q(f, t) = b_0 + b_1 f + b_2 f^2 + b_3 f^3 + b_4 t + b_5 t f + b_6 t f^2 + b_7 t f^3 + b_8 t^2 + b_9 t^2 f + b_{10} t^2 f^2 + b_{11} t^2 f^3 + b_{12} t^3 + b_{13} t^3 f + b_{14} t^3 f^2 + b_{15} t^3 f^3, \quad (1)$$

где b_0, b_1, \dots, b_{15} – коэффициенты математической модели.

Согласно методу всех возможных регрессий необходимо, последовательно исключая коэффициенты модели (1), исследовать все возможные варианты ФП и выбрать модели, удовлетворяющие заданной предельно допустимой относительной погрешности измерения расхода. При использовании полной модели вида (1) число возможных частных моделей ФП составляет $W = 2^{(3+1)(3+1)} = 65\ 536$.

Наиболее известным методом построения математических моделей является метод наименьших квадратов (МНК). В работе [9] было проведено сравнение стандартного МНК и взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК), применительно к задаче поиска модели функции преобразования вихреакустических расходомеров с широким диапазоном измерений. Было показано, что частота образования вихрей f за телом обтекания вихреакустического расходомера является величиной гетероскедастичной. Применение ВМНК позволяет преодолеть неоднородность дисперсий измеряемой величины (гетероскедастичность) на всем диапазоне изменений.

4. Результаты исследования моделей функции преобразования

Для проведения исследований математических моделей двухфакторной ФП вихреакустического расходомера методом всех возможных регрессий была составлена программа в среде Matlab 7.11. В программе для каждого исследуемого расходомера было найдено 65 536 различных математических моделей функции преобразования с использованием ВМНК. Каждая модель была построена по экспериментальным данным, предназначенным для градуировки, и проверена в точках верификации. Затем отобраны и сохранены модели ФП, которые обеспечивают установленный класс точности исследуемых расходомеров. Количество отобранных моделей ФП для каждого диаметра условного прохода расходомера приведено в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований двухфакторных математических моделей функции преобразования вихреакустического расходомера

Ди	Серийный номер датчика	Количество моделей ФП, обеспечивающих класс точности	Количество <i>общих</i> моделей ФП	
25	...0414	3971	2149	11
	...0415	12686		
	...0416	8082		
	...0417	12491		
	...0418	11072		
32	...0419	10777	115	
	...0420	14118		
	...0421	11906		
	...0422	397		

Среди отобранных моделей был произведен поиск *общих* математических моделей для каждого исследуемого типоразмера расходомера. Для расходомеров Ду 25 и Ду 32 было найдено значительное количество общих ФП для каждого типоразмера и *одиннадцать общих моделей*, подходящих *одновременно* для двух типоразмеров.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность использования двухфакторной модели ФП для вихреакустических расходомеров и позволили уточнить вид *общих* моделей ФП.

5. Адаптация модели функции преобразования для серийного производства

Рассмотрим более подробно наиболее простую модель вида (2) из *одиннадцати общих моделей* ФП, подходящих *одновременно* для двух типоразмеров всех исследованных расходомеров.

$$Q(f, t) = b_0 + b_1 f + b_2 f^2 + b_3 f^3 + b_5 t f + b_6 t f^2 + b_7 t f^3 + b_9 t^2 f + b_{12} t^3 + b_{13} t^3 f. \tag{2}$$

Как уже было отмечено ранее, при серийном производстве расходомеров нет возможности проводить испытания при различных температурах измеряемой среды, так как это приводит к значительному удорожанию продукции и увеличению времени испытаний. В связи с этим необходимо определить температурную зависимость для всех расходомеров одного типоразмера.

Адаптацию модели ФП вида (2) для серийного производства продемонстрируем на примере вихреакустических расходомеров с диаметром условного прохода 32 мм.

По результатам испытаний 4 расходомеров (см. табл. 3) при различных температурах измеряемой среды были найдены значения коэффициентов $b_5, b_6, b_7, b_9, b_{12}, b_{13}$ математической модели вида (2), определяющие температурную зависимость. Так как коэффициенты модели ФП для исследуемых расходомеров одного типоразмера незначительно отличаются друг от друга, было принято решение об усреднении этих коэффициентов. Таким образом, мы получили единую температурную зависимость для всех расходомеров исследуемого типоразмера.

Особенность испытаний при серийном производстве, как указывалось ранее, заключается в том, что испытания проводятся при одном значении температуры измеряемой среды и пяти режимах расхода (табл. 4).

В связи с этим алгоритм поиска остальных коэффициентов математической модели ФП вида (2) можно разбить на ряд этапов в соответствии со схемой алгоритма на рис. 1.

Данные испытаний при серийном производстве расходомеров

Расход, м ³ /ч	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Температура измеряемой среды, °С
Частота вихребразования, Гц	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	

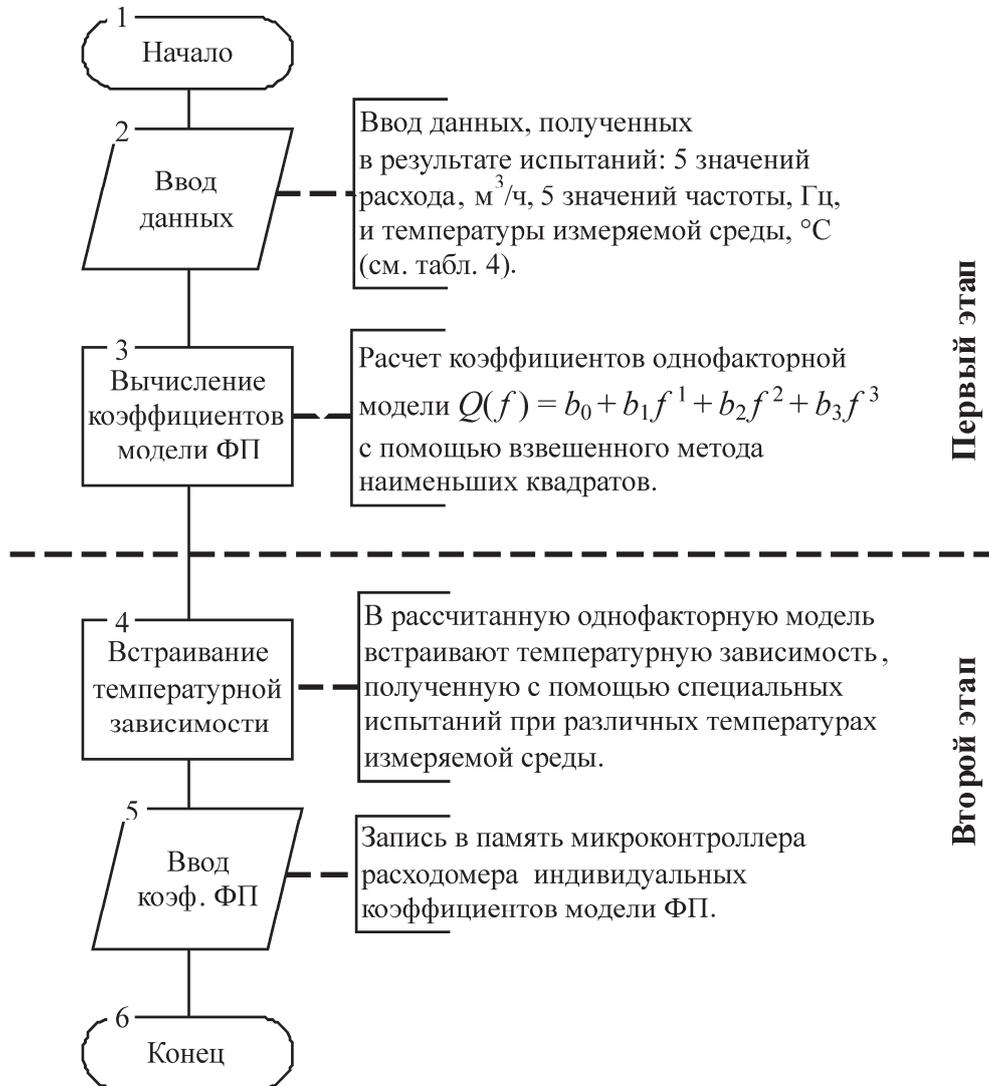


Рис. 1. Схема алгоритма нахождения значений коэффициентов модели ФП

Первый этап: построение однофакторной модели. На основе данных испытаний из табл. 4 находим значения коэффициентов однофакторной модели ФП вида

$$Q(f) = b_{0f} + b_{1f}f + b_{2f}f^2 + b_{3f}f^3, \quad (3)$$

где b_{0f}, \dots, b_{3f} – коэффициенты модели.

Второй этап: в модель вида (3) «встраиваем» температурную зависимость, найденную с помощью специальных испытаний при различных температурах измеряемой среды (см. табл. 2). Для этого представим математическую модель (2) в виде

$$Q(f, t) = b_0 + b_{12}t^3 + (b_1 + b_5t + b_9t^2 + b_{13}t^3)f + (b_2 + b_6t)f^2 + (b_3 + b_7t)f^3, \quad (4)$$

Коэффициенты $b_5, b_6, b_7, b_9, b_{12}, b_{13}$ модели (2) были приняты нами ранее как средние значения для всех расходомеров исследуемого типоразмера. Из сопоставления уравнений (3) и (4) видно, что остальные коэффициенты модели ФП вида (2), а именно b_0, b_1, b_2, b_3 можно найти в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= b_{0f} - (b_{12}t^3); \\
 b_1 &= b_{1f} - (b_5t + b_9t^2 + b_{13}t^3); \\
 b_2 &= b_{2f} - (b_6t); \\
 b_3 &= b_{3f} - (b_7t),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где t – температура измеряемой среды при серийных испытаниях

Описанный алгоритм поиска коэффициентов математической модели ФП вида (2) был проверен на данных серийных испытаний расходомеров, проведенных в 2011 году. Выборка представлена результатами испытаний 186 вихреакустических расходомеров с широким диапазоном измерений (от $Q_{\max}/100$ до Q_{\max} , где Q_{\max} – верхний предел измерения расхода). Для всех расходомеров были использованы одинаковые значения коэффициентов $b_5, b_6, b_7, b_9, b_{12}, b_{13}$, определяющих температурную зависимость, и по результатам серийных испытаний для каждого расходомера были найдены *индивидуальные* значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для модели ФП вида (2).

6. Применение адаптированной модели функции преобразования в серийном производстве

При серийном выпуске, перед испытанием расходомера, в память микроконтроллера записывают значения коэффициентов модели функции преобразования, обеспечивающие установленный класс точности для большинства расходомеров одного типоразмера, такие коэффициенты будем называть *начальными*. Затем проводят испытания, с целью установления соответствия испытываемого расходомера заданному классу точности. В случае превышения допустимой погрешности проводят корректировку значений коэффициентов модели ФП и повторное испытание расходомера. Алгоритм проведения испытаний при производстве расходомеров описан схемой алгоритма на рис. 2.

Важной задачей является подбор таких *начальных* значений коэффициентов модели функции преобразования, чтобы большинство расходомеров соответствовало заданному классу точности. В связи с этим значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для всех расходомеров одного типоразмера были найдены как медианы выборок *индивидуальных* значений коэффициентов для каждого из 186 испытанных в 2011 году расходомеров.

Полученная модель при использовании таких *начальных* значений коэффициентов позволяет обеспечить выход расходомеров, соответствующих установленному классу точности после первого испытания, более 95 % (177 расходомеров из 186 исследованных). Перед повторным испытанием расходомера проводится корректировка коэффициентов модели функции преобразования путем определения *индивидуальных* коэффициентов ФП данного расходомера. В результате все 100 % испытываемых расходомеров соответствуют установленному классу точности.

Для иллюстрации пригодности математической модели вида (2) в табл. 6 приведены результаты серийных испытаний 10 расходомеров. Серийные испытания расходомеров проводились на пяти режимах расхода, лежащих в диапазоне измерения расходомера. Начинают эксперимент при больших значениях расхода измеряемой жидкости (режим 1), заканчивают на малых расходах (режим 5). В качестве показателя качества модели ФП использовалась относительная погрешность, рассчитанная согласно выражению (6), где $Q_{\text{эт}}$ – показания эталонного расходомера при проведении испытаний, $Q_{\text{модели}}$ – значение расхода по показаниям испытанного расходомера, рассчитанного согласно модели ФП вида (2), м³/ч

$$\delta = \frac{Q_{\text{эт}} - Q_{\text{модели}}}{Q_{\text{эт}}} \cdot 100 \% .
 \tag{6}$$

В табл. 6 приведены значения относительных погрешностей измерения для 10 расходомеров, из них один расходомер (серийный номер 1871) не удовлетворяет заданному классу точности, так как имеет место превышение предельно допустимой погрешности. Согласно алгоритму испытаний (см. рис. 2), данный расходомер был отправлен на корректировку коэффициентов и повторное испытание. В табл. 7 приведены погрешности измерения этого расходомера после повторных испытаний, которые уже соответствуют заявленному классу точности.

Для сравнения в этой же таблице приведены и погрешности остальных расходомеров, для которых также были проведены повторные испытания. Налицо существенное снижение приве-

денной погрешности расходомеров, что можно расценивать как значительное повышение метрологического запаса по этой погрешности.

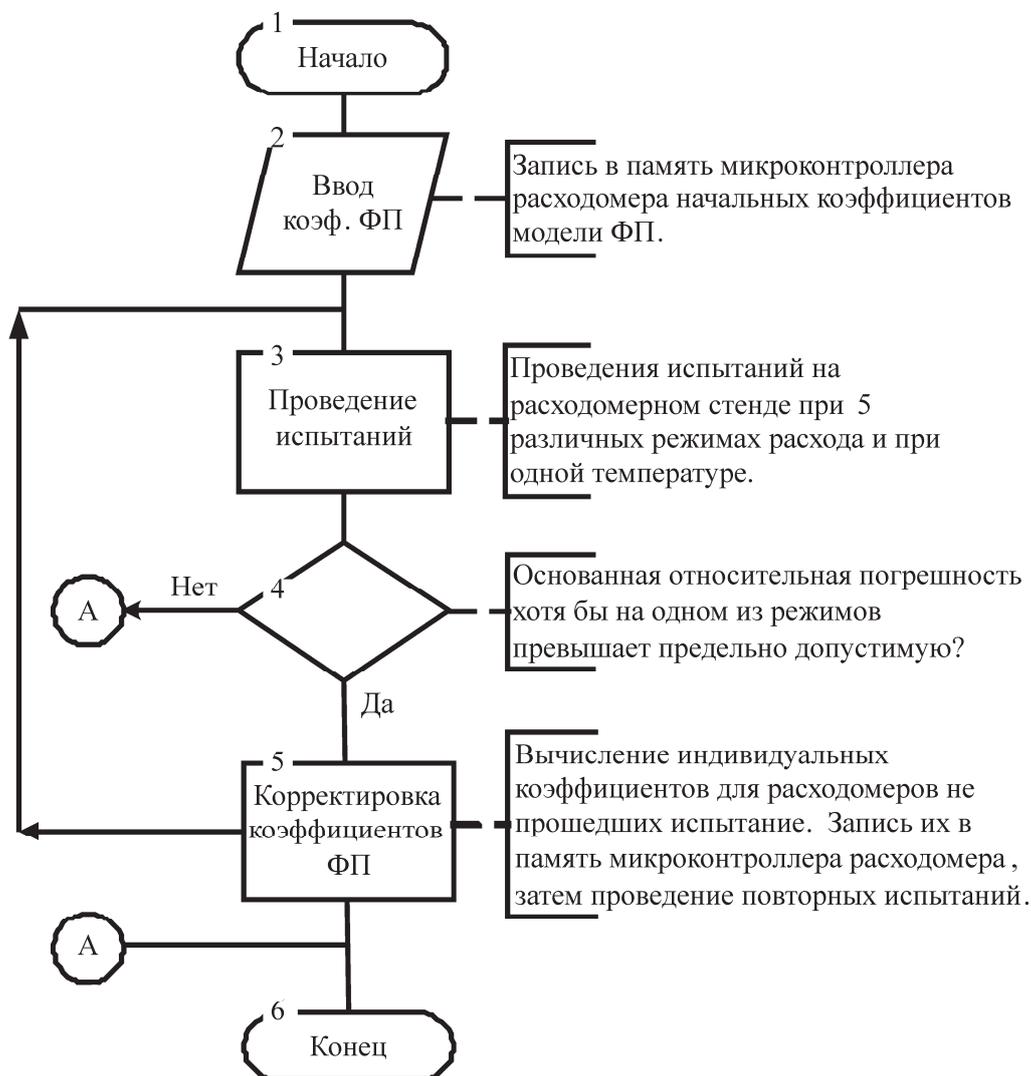


Рис. 2. Схема алгоритма испытаний при серийном производстве расходомеров

Результаты серийных испытаний 10 расходомеров с использованием начальных значений коэффициентов модели ФП вида (2) Таблица 6

Серийный номер	Режимы расхода				
	1	2	3	4	5
	Относительные погрешности измерения расхода, %				
...1730	-0,34	-0,93	-0,73	-0,05	1,61
...1728	-0,04	-0,31	-0,07	0,28	-1,02
...1729	-0,35	-0,47	-0,71	0,58	2,07
...1865	-0,11	0,19	-0,14	0,55	1,53
...1871	-1,15	-0,93	-1,04	-0,48	-1,28
...1862	-0,31	-0,19	-0,19	0,27	0,72
...1861	-0,18	0,01	-0,24	0,27	-0,69
...1867	0,20	0,24	0,09	-0,13	1,02
...1866	-0,31	-0,16	-0,37	-0,53	-0,71
...1870	-0,37	0,06	0,19	0,23	-0,19
Предельно допустимая погрешность, %	1	1	1	1,5	3

Таблица 7

Результаты серийных испытаний 10 расходомеров с использованием индивидуальных значений коэффициентов модели ФП вида (2)

Серийный номер	Режимы расхода				
	1	2	3	4	5
	Относительные погрешности измерения расхода, %				
...1730	0,00	-0,01	0,05	-0,06	0,02
...1728	-0,01	0,04	-0,27	0,36	-0,13
...1729	0,00	0,01	-0,07	0,11	-0,05
...1865	0,00	0,01	-0,05	0,07	-0,03
...1871	-0,01	0,04	-0,27	0,40	-0,16
...1862	0,00	0,01	-0,05	0,08	-0,03
...1861	-0,01	0,05	-0,29	0,41	-0,16
...1867	0,01	-0,03	0,22	-0,35	0,16
...1866	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...1870	0,00	0,01	-0,07	0,10	-0,04
Предельно допустимая погрешность, %	1	1	1	1,5	3

7. Дальнейшие пути повышения точности измерения расхода

Проведение повторных испытаний для всех расходомеров при серийном производстве приведёт к удорожанию продукции. Однако использование *индивидуальных* коэффициентов, полученных при повторных испытаниях, дает возможность значительно повысить точность измерения расхода. Выделение признаков, влияющих на значения коэффициентов функции преобразования, и выбор определенных коэффициентов для каждого значения признака таким образом, чтобы они были наиболее близки к индивидуальным значениям, может привести к существенному повышению точности расходомеров.

Классификация расходомеров на несколько групп, еще на стадии производства, даст возможность использовать определенный набор коэффициентов для каждой группы. Это, в свою очередь, позволит, не увеличивая количество испытаний, повысить точность измерения расходомеров, а также увеличить число расходомеров, удовлетворяющих заданному классу точности уже после первого испытания. Для создания такой классификации необходимо провести комплекс исследований по выделению основных признаков, влияющих на функции преобразования расходомера и степени их влияния, и, возможно, провести моделирование проточных частей вихреакустических расходомеров.

Заключение

Проведены исследования двухфакторной функции преобразования вихреакустических расходомеров на основании данных специальных испытаний при различных температурах измеряемой среды. Доказана принципиальная возможность применения полиномиальной математической модели ФП. Найдена модель, удовлетворяющая заданному классу точности исследуемых расходомеров, при всех температурах измеряемой среды.

Проведена адаптация полной полиномиальной модели к условиям производства и показано успешное применение полученной модели для серийного производства вихреакустических расходомеров.

Литература

1. Ghaoud, T. *Modelling and tracking a vortex flow-meter signal* / T. Ghaoud, D.W. Clarke // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2002. – No. 13. – P. 103–117.
2. *On measurement uncertainty of a vortex flowmeter* / J.J. Miao, C.F. Yeh, C.C. Hu, J.H. Chou // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2005. – No. 16. – P. 397–404.
3. *Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection* / Dandan Zheng, Tao Zhang, Juan Xing, Jianqiang Mei // *Measurement science and technology*. – 2007. – No. 18 – P. 2769–2776.
4. De-ming, H. *A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique* / Huang De-ming, Li Wen-jun,

Zheng Yong-jun // *International Conference on Networking and Information Technology*. – 2010. – P. 322–325.

5. Volker, H. *Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters* / Hans Volker, Harald Windorferb // *Measurement* – 2003. – No. 33. – P. 121–133.

6. Кремлевский, П.П. *Расходомеры и счетчики количества: справ.* / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.

7. Лапин, А.П. *Выбор модели функции преобразования вихреакустических расходомеров* / А.П. Лапин, А.М. Дружков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2012. – Вып. 17. – № 35 (294). – С. 161–164.

8. Дрейпер, Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2 ч.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – Ч. 2, кн. 2. – 351 с.

9. Лапин, А.П. *Применение взвешенного метода наименьших квадратов при исследовании функции преобразования вихреакустических расходомеров* / А.П. Лапин, А.М. Дружков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т. 12, № 2. – С. 109–113.

Лапин Андрей Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); a_lapin@mail.ru.

Дружков Александр Михайлович, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); sandruzh@gmail.com.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2013, vol. 13, no. 3, pp. 4–12

SELECTION AND RESEARCH OF TWO-FACTOR MODEL FOR CONVERSION FUNCTION OF VORTEX SONIC FLOWMETERS

A.P. Lapin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, a_lapin@mail.ru,
A.M. Druzhkov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
sandruzh@gmail.com

The paper presents a method of searching the two-factor mathematical model conversion functions of vortex sonic flowmeters based on the results of special tests. In the proposed model resulting flow depends on the frequency of vortex shedding behind bluff body and the temperature of the liquid. Model selection was done using the method of all possible regression, coefficients was calculation made based on the weighted least squares method.

We propose a method for adapting a two-factor conversion functions for use in flowmeter series production. The results of the proposed functions usage are shown on the example data from the production of vortex sonic flowmeters.

Keywords: vortex sonic flowmeters, conversion functions, weighted least squares method, all-possible regressions method.

References

1. Ghaoud T., Clarke D.W. Modelling and Tracking a Vortex Flow-meter Signal. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, no. 13, pp. 103–117.

2. Miao J.J., Yeh C.F., Hu C.C., Chou J.H. On Measurement Uncertainty of a Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, no. 16, pp. 397–404.

3. Dandan Zheng, Tao Zhang, Juan Xing, Jianqiang Mei. Improvement of the HHT Method and Application in Weak Vortex Signal Detection. *Measurement Science and Technology*, 2007, no. 18, pp. 2769–2776.

4. Huang De-ming, Li Wen-jun, Zheng Yong-jun/ A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique/ *International Conference on Networking and Information Technology*, 2010, pp. 322–325.

5. Volker Hans, Harald Windorferb. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters. *Measurement*, 2003, no. 33, pp. 121–133.
6. Kremlevskiy, P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva: Spravochnik* [Flowmeters and Counters: hand-book], Leningrad, Mashinostroenie, 1989. 701 p.
7. Lapin, A.P., Druzhkov A.M. Selection of Model for Conversion Function of Vortex Sonic Flowmeters. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics»*, 2012, vol. 17, no. 294, pp. 161–164. (in Russian)
8. Draper N. *Prikladnoy regressionnyy analiz: V 2 ch. Ch. 2: Kniga 2* [Applied regression analysis]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 351 p.
9. Lapin, A.P., Druzhkov A.M. Usage of weighted least squares method conversion functions for vortex sonic flowmeters research [Primenenie vzveshennogo metoda naimen'shikh kvadratov pri issledovanii funktsii preobrazovaniya vikhreakusticheskikh raskhodomerov] *Bulletin of the South Ural State University. Series «Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics»*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. (in Russian)

Поступила в редакцию 28 мая 2013 г.