

К. В. Гудков, К. Ю. Пискаев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ

K. V. Gudkov, K. Yu. Piskaev, M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva

SIMULATION MODELING FOR COMPONENTS OF DATA-MEASURING SYSTEMS FOR FLUID FLOW CONTROL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Показана целесообразность применения имитационного моделирования на стадии проектирования информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей. Цель работы: наглядно представить примененные методы модельно-ориентированного проектирования, включающие в себя имитационное моделирование механической, электронной и вычислительной частей информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей. **Материалы и методы.** В качестве среды имитационного моделирования выбрано программное обеспечение Matlab/Simulink. **Результаты.** В работе представлены имитационные модели прямотрубного кориолисового расходомера, построенные в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink. Выполнено моделирование работы расходомера при различных условиях протекания жидкой среды, а также проведена имитация внешних вибрационных воздействий как на сам расходомер, так и на элементы трубопровода. На основании полученных экспериментальных данных подобраны характеристики системы обработки данных. Рассмотрена проблематика влияния внешних воздействий и способов их устранения. Показаны процессы динамического изменения физических свойств тел, связанных с их молекулярной структурой, а также рассмотрены технические и технологические процессы, способные внести изменения в точностные параметры измерительного прибора вследствие разброса параметров элементов конструкции. **Выводы.** Исследования имитационных моделей позволили определить технические ограничения, которые могут значительно снизить точность работы информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей на месте ее эксплуатации.

A b s t r a c t. Background. Applicability of simulation modeling when designing a data-measuring system for fluid flow control has been illustrated. The work objective is to visualize the applied techniques of the model-based design including simulation modeling of mechanical, electronic and computing components of the data system for fluid flow control. **Materials and methods.** Matlab/Simulink software functions as simulation modeling environment. **Results.** Simulation models of straight-tube Coriolis acceleration flowmeter constructed in Matlab/Simulink simulation modeling environment have been presented. Simulation of flowmeter operation under various flow medium conditions has been performed, as well as simulation of external vibration input both on the flowmeter and pipeline components. Relying on experimental findings, parameters of the data processing system have been selected. External inputs and remedies for them have been discussed. Dynamic changes in physical properties of bodies in terms of their molecular architecture have been illustrated; technical and technological processes likely to change accuracy characteristics of a measuring instrument due to parameter spread of assembly components have been also described. **Conclusions.** Research and

analysis of simulation models have helped to define technical constraints threatening to impair operating accuracy of the data-measuring system for fluid flow control on-site.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная система контроля расхода жидкостей, модуль сбора данных, имитационное моделирование, кориолисов расходомер, элементы модельно-ориентированного проектирования.

К e y w o r d s: data-measuring system for fluid flow control, data acquisition module, simulation modeling, Coriolis flowmeter, model-based design techniques.

Введение

В современных технически сложных системах особую роль играет процесс отладки и верификации. Для этого применяют дорогостоящие макетные образцы. Помимо этого значительно увеличивается время проектирования, а имеющиеся недостатки и ошибки выявляются только на конечных этапах. Для решения этой проблемы целесообразно применять имитационное моделирование еще на стадии проектирования отдельных узлов систем. Далее разработанные модели отдельных частей системы объединяют между собой для отладки их взаимодействия. Подобное применение имитационного моделирования известно как модельно-ориентированное проектирование.

Отдельный класс технически сложных систем представляют собой информационно-измерительные системы физических величин прецизионной точности, в частности, системы контроля расхода жидкостей или газов на базе кориолисовых расходомеров. Разработка подобной системы методами модельно-ориентированного проектирования включает в себя имитационное моделирование механической и электронно-вычислительной частей расходомера [1–3].

Эти расходомеры имеют одну или несколько расходных трубок прямой или изогнутой конфигурации. Каждая конфигурация расходной трубки в массовом расходомере Кориолиса имеет набор собственных вибрационных мод [4, 5], который может относиться к типу простого изгиба, кручения или к смешанному (связанному) типу. Каждая расходная трубка приводится в колебательное движение в резонансе на одной из этих собственных мод. Жидкость втекает в расходомер из смежного трубопровода на стороне впуска, направляется в расходную трубку (или трубки) и вытекает из расходомера в трубопровод, подключенный на выпускной стороне расходомера. Собственные вибрационные моды вибрирующей (колеблющейся), наполненной жидкостью системы, распределяются частично комбинированной массой расходных трубок и материалом внутри расходных трубок.

Когда нет потока через расходомер, все точки вдоль расходной трубки колеблются в одинаковой фазе в результате приложения силы возбуждения. Как только начнет протекать поток материала, ускорения Кориолиса приводят к появлению различных фаз для каждой точки вдоль расходной трубки [6, 7]. Фаза на стороне впуска расходной трубки имеет запаздывание относительно фазы возбуждения, в то время как фаза на стороне выпуска имеет опережение относительно фазы возбуждения. На корпусе расходной трубки размещены датчики для выработки синусоидальных сигналов, несущих информацию относительно движения расходной трубки. Разность фаз между двумя сигналами датчиков пропорциональна массовому расходу материала, протекающего через расходную трубку.

Измерения в массовом расходомере Кориолиса должны быть произведены с высокой степенью точности, так как часто ставится требование, чтобы полученная информация о массовом расходе имела точность по меньшей мере 0,15 % отсчета [8]. Блок обработки сигналов, на который поступают выходные сигналы датчиков, с высокой точностью измеряет разность фаз и вырабатывает желательные характеристики протекающего обрабатываемого материала с требуемой точностью, которая составляет по меньшей мере 0,15 % отсчета.

Для достижения указанной точности необходимо, чтобы блок обработки сигнала с высокой точностью производил измерение фазового сдвига двух сигналов, которые поступают на него от расходомера [9, 10]. Так как фазовый сдвиг между двумя выходными сигналами измерительного прибора представляет собой информацию, которая используется в блоке обработки для получения характеристик материала, необходимо, чтобы блок обработки не вводил никакого фазового сдвига, который мог бы маскировать информационный фазовый сдвиг, создаваемый выходными сигналами датчика. На практике требуется, чтобы этот блок обработки имел чрезвычайно малый собственный присущий ему фазовый сдвиг, так чтобы фаза каждого выходного сигнала сдвигалась менее чем на 0,001 % [11], а в некоторых случаях даже

менее чем на несколько миллионных градуса. Указанная точность измерения фазы требуется, если нужно достичь точности выше 0,15 % для производной информации, касающейся обрабатываемого материала.

Материалы и методы

В качестве среды имитационного моделирования выберем MATLAB/Simulink. Он позволяет моделировать как механические компоненты системы, так и систему сбора и обработки информации.

Рассмотрим Simulink-модель механической части системы (рис. 1). Она позволяет исследовать измерение параметров потока жидкости при различных динамически изменяющихся условиях. При этом скорость потока жидкости прямо пропорциональна временной задержке между левыми и правыми половинами расходомерной трубки. Задержка возникает вследствие силы Кориолиса, которая возникает во время колебаний расходомерной трубки с текущей в ней жидкостью. Направление силы Кориолиса в левой и правой половине трубки направлено в противоположные стороны [3, 12]. Коэффициент пропорциональности для каждого расходомера зависит от механических свойств трубки, воздействия колебательного механизма и передаточных функций измерительных преобразователей [3].

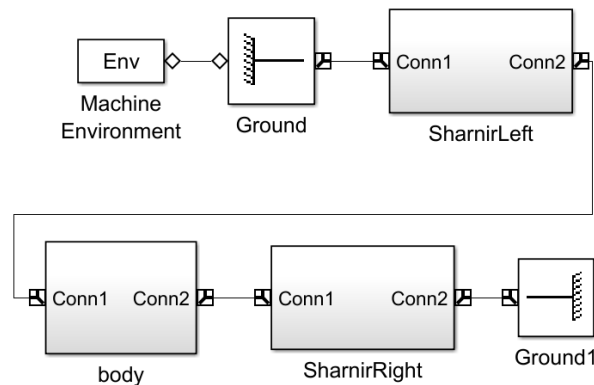


Рис. 1. Модель трубки кориолисова расходомера

Опишем подробнее составные части модели: Sharnir Left и Sharnir Right – это левый и правый шарниры соответственно. Они делают расходомерную трубку подвижной относительно жестких заделок Ground, так что перемещения краев трубки возможны только в оси Oх.

Рассмотрим подробнее подсистему Body, в состав которой входят расходомерная трубка и датчики давления (рис. 2).

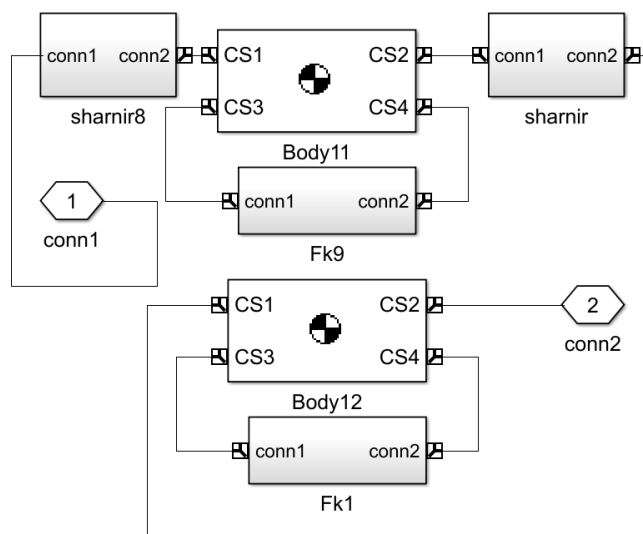


Рис. 2. Модель расходомерной трубки и датчиков

Для описания колебания трубки принимаем ограничение, не позволяющее совершать колебания, кроме вертикальной плоскости. В реальных расходомерах этого добиваются правильной установкой и калибровкой. Наличие боковых колебаний снижает точность измерения параметров потока. Другим ограничением выступает дискретность расходомерной трубки. Это связано с невозможностью точного описания колебательных процессов средствами Simulink. Физические тела представляются абсолютно твердыми элементами с возможностью упругого соединения между ними. Для обхода данного ограничения трубки представляют конечным набором малых элементов, увеличение числа которых позволяет приблизить ее механические свойства к реальным прототипам. Для этого параметры упругого соединения подбираются эмпирическим путем. На рис. 2 продемонстрированы две подсистемы, включающие в себя наборы блоков с имитацией трубки и протекающей жидкости. К параметрам трубки относят жесткость, демпфирующие свойства, вес трубки, ее прогиб под собственным весом и наличие отложений, влияющих на диаметр внутреннего сечения и механические характеристики объекта моделирования. К параметрам жидкости относятся плотность, скорость, температура. Изменение параметров жидкости вызывает изменение параметров силы Кориолиса, рассчитываемой в этих же подсистемах для каждого отрезка трубки. На расчет силы Кориолиса также влияют параметры, задаваемые блоком имитации принудительных колебаний (рис. 3).

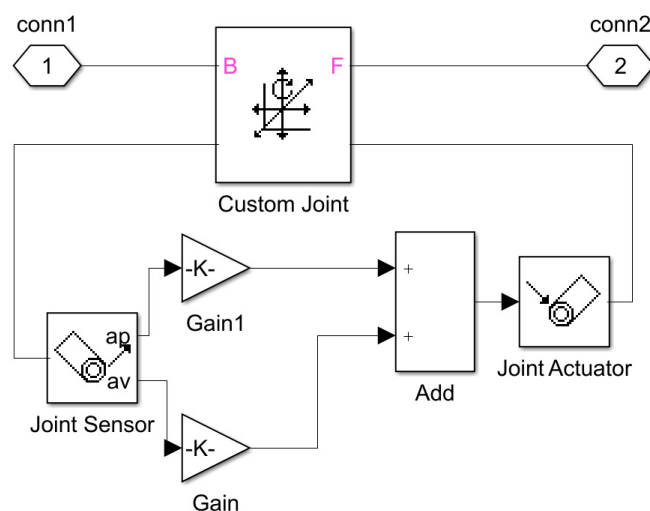


Рис. 3. Simulink – модель блока имитации принудительных колебаний

В блоке имитации принудительных колебаний задаются начальные параметры колебания расходомерной трубки. В ходе моделирования они могут изменяться, так как частота колебаний соответствует резонансной частоте заполненной жидкостью трубки. В зависимости от частоты колебаний рассчитывается плотность жидкости. В блоке записываются, сохраняются в памяти мгновенные значения скорости потока жидкости, чтобы использовать его для расчета силы Кориолиса и вычисляются значения временной задержки между входным и выходным сигналом. Они используются в качестве эталонных значений при проверке данных, получаемых с имитационных моделей датчиков давления, при моделировании которых учитывались метрологические и физические параметры, а именно: габариты, масса, упругость чувствительного элемента, максимальный прогиб и др. В модели для реализации быстрого действия и чувствительности датчика были подобраны значения жесткости и демпфирующих свойств системы измерения силы.

Результаты

Выполним моделирование расходомера, используя средства Matlab/Simulink, основываясь на приближенном отображении гибкого тела последовательностью твердых тел, соединенных между собой пружинящими и амортизирующими элементами. Жесткость пружин и коэффициенты демпфирования амортизаторов описываются функциями материальных свойств и геометрией гибких элементов.

Процедуру моделирования целесообразно разбить на пять этапов:

- 1) трубка делится на дискретные элементы, и определяются степени свободы каждого элемента;
- 2) степени свободы задаются посредством соединений в середине каждого элемента вдоль нейтральной оси;
- 3) согласно теории гибкого тела определяются эффективные константы геометрии пружины, материальные свойства и граничные условия;
- 4) задаются демпфирующие свойства каждого соединения;
- 5) полученные элементарные отрезки соединяются между собой.

В данной модели имитируем тонкостенную трубку, изготовленную из алюминия, диаметром 60 мм, рабочая частота колебаний расходомера составит 350 Гц, амплитуда 10 мкм, что является типовой частотой для расходомеров подобных типоразмеров. Протекание жидкости имитируется изменением массы элементов трубки и воздействиями на блоки расчета влияния силы Кориолиса, остальные процессы, происходящие в трубопроводе при прохождении по нему жидкости, не моделируются. В модели задаются параметры движения трубки, начальная скорость потока, вычисляются сила Кориолиса и ее влияние на форму колебания расходомерной трубки. Помимо этого, в модели задаются значения плотности и объема воды, плотности и размера трубки, коэффициент демпфирования и жесткости шарниров.

Между соединяющимися элементами задаются угол поворота, относительная угловая скорость, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования, силовое воздействие между элементами.

Коэффициенты жесткости и демпфирования задаются в соответствии с расчетными значениями величины прогиба трубки под действием тестовых сил.

Модель позволяет измерить вектор проекций абсолютной угловой скорости точки тела, к порту которой он присоединен.

Выполним моделирование протекания жидкой среды с различными скоростями потока для установления линейности показаний модели. Тестирование проводилось со скоростями 1, 5, 10 м/с. Для анализа быстроизменяющегося потока смоделируем поток жидкости с синусоидальным изменением скорости (амплитуда – 10 мм, частота – 350 Гц). Также исследовано поведение системы при наличии ступенчатого изменения скорости жидкости. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

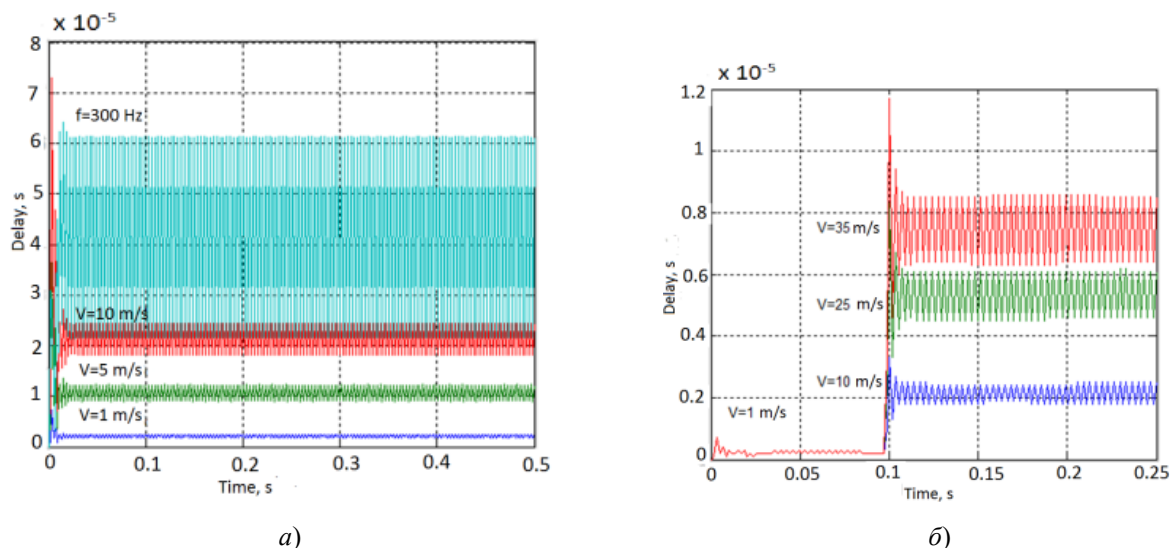


Рис. 4. Графики зависимости задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, от начальной скорости потока: а – постоянная скорость; б – ступенчатое изменение скорости потока

Из графиков видно, что шумовая составляющая возрастает с увеличением скорости потока, это может быть связано только с неточностью вычисления временной задержки между частями трубы. При этом значения лежат в рамках одного диапазона и могут быть успешно усреднены. Из анализа синусоидального входного сигнала видно, что система успевает среагировать на периодичное изменение скорости жидкости. Амплитуда выходного сигнала по-

стоянна и не имеет значительных отклонений или грубо искаженных результатов. При ступенчатом изменении скорости потока в системе наблюдаются остаточные колебания скорости на незначительном временном интервале, но при этом возникают колебания выходного сигнала при постоянной скорости потока.

Для улучшения наглядности результатов моделирования выполним фильтрацию полученных результатов моделирования (рис. 5).

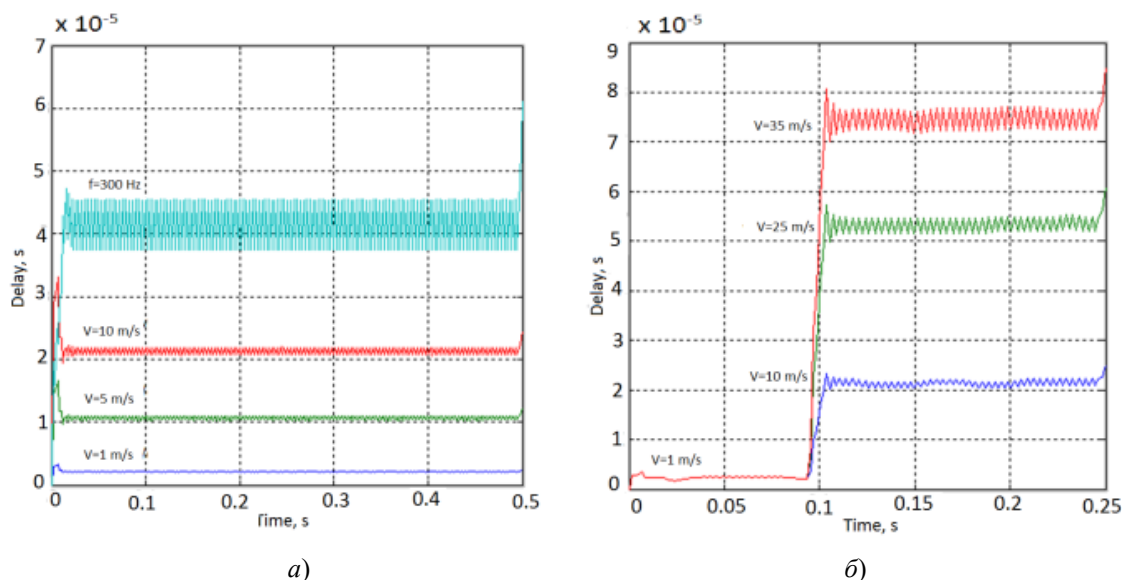


Рис. 5. Усреднение значений задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, от начальной скорости потока: *a* – постоянная скорость; *б* – ступенчатое изменение скорости потока

Благодаря процессу усреднения значений произошло избавление от грубо искаженных результатов измерений. Графики стали более гладкими. Еще можно заметить, что чем выше скорость потока в трубке, тем больше значение задержки. Разность интервалов времени между сигналами измеряется в микросекундах.

Измеряемый поток почти никогда не бывает идеальным, чаще всего на него воздействуют внешние факторы, например низкая скорость, несформированность и пульсации потока, шероховатость трубопровода, многофазность среды (наличие воздуха в воде, наличие воды в паре), содержание механических примесей. На рис. 6 изображены графики, где проходящая по трубопроводу жидкость не является идеальной. Данные графики отражают задержку между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, находящихся на разных концах трубки. Тестирование проводилось со скоростями 1, 5, 10 м/с и с шумом, амплитуда которого 8 мм и частота 350 Гц.

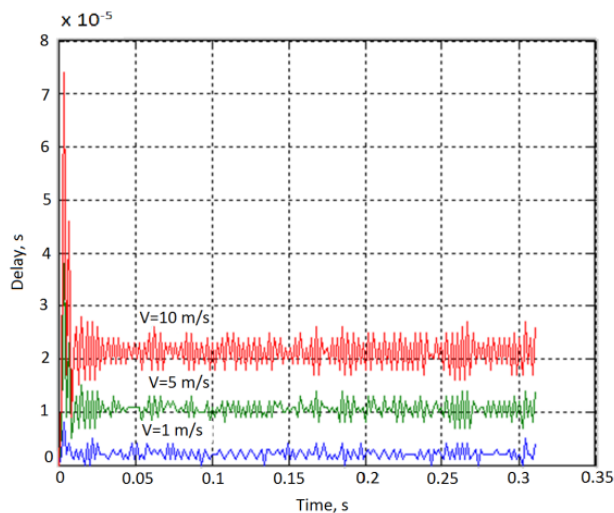


Рис. 6. Графики задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления

Из-за искаженного потока жидкости, проходящего по расходомеру, результат измерения получается некорректным. Чтобы предотвратить это, необходима дополнительная фильтрация (рис. 7) [13–16]. Применим полосовой фильтр, обеспечивающий подавление сигналов за пределами информативной полосы, ограниченной частотой работы расходомера.

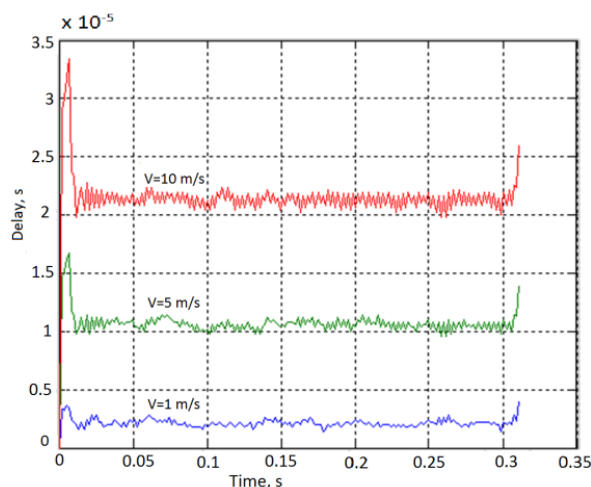


Рис. 7. Фильтрация значений задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления

Незначительные колебания присутствуют в сигнале. Это обусловлено совпадением рабочей частоты расходомера и полосой частот промышленных шумов. В работах [17, 18] приведены способы устранения подобных искажений в информативном сигнале.

По полученным результатам моделирования можно рассчитать значение сигнал/шум (SNR). Отношение сигнал/шум – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума. В табл. 1 приведена зависимость отношения SNR от начальной скорости потока в зашумленных и отфильтрованных значениях задержки.

Таблица 1

Зависимость отношения SNR от начальной скорости потока в зашумленных и отфильтрованных значениях задержки

Значение начальной скорости потока, м/с	Отношение SNR в зашумленных значениях задержки	Отношение SNR в отфильтрованных значениях задержки
1	48,9955	39,8855
5	76,9414	39,1864
10	89,6763	39,1864

Отношение сигнал/шум в зашумленных значениях задержки увеличивается с повышением начальной скорости потока, а отношение сигнал/шум в отфильтрованных значениях задержки примерно одинаковое.

Обсуждение

Использование модельно-ориентированного подхода позволяет решить большинство проектных задач еще на этапе моделирования. Но существует и ряд ограничений, а именно, что при создании массового расходомера возникает необходимость его калибровки для выявления предельной точности измерений. Имитационная модель всегда будет показывать абсолютную (максимальную для данных условий моделирования) точность. Для устранения такого эффекта необходимо вводить в модель имитацию помех и ограничивать искусственно точность измерений. Рассмотрим подробнее возможные ограничения, которые негативно повлияют на точность измерения расхода.

Другим ограничением выступает калибровка датчика. Процесс калибровки включает в себя проверку показаний датчика с помощью рабочих средств измерения. Они имеют погреш-

ность измерений $\delta_0 = \pm(0,1\dots 0,2) \%$. Если разрабатываемый датчик имеет более высокую погрешность измерений, то необходимо использовать более точные рабочие эталоны. Эталоны второго разряда обладают минимальной погрешностью $\delta_0 = \pm 0,15 \%$, а эталон первого разряда $\delta_0 = \pm 0,05 \%$. Следующими средствами калибровки являются рабочие эталоны, заимствованные из других поверочных систем. Они обеспечивают точность измерений с погрешностью $\delta_0 = \pm 0,02 \%$. Наиболее точным средством калибровки выступает первичный эталон с погрешностью $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-4} \%$ [19].

Достижению предельной точности измерений препятствует наличие погрешностей, от которых невозможно полностью избавиться или скомпенсировать. При работе кориолисова расходомера измерительная трубка непрерывно вибрирует на своей резонансной частоте ω_p . Поскольку значение ω_p зависит от соотношения $\sqrt{k/m}$, то при неизменных геометрических размерах трубки можно определить зависимость ω_p от плотности ρ . Практически для этих целей используют только воду и воздух. Плотность воды не является постоянной величиной. Плотность воды колеблется в пределах $\pm 0,0000135 \text{ г/см}^3$. Эта величина может существенно влиять на показания датчика, вызывая погрешность в $0,00135 \%$ [19].

Также существуют технические проблемы при формировании потока с необходимыми точностными характеристиками по массовому расходу и плотности. Следовательно, невыполнение условия $k = \text{const}$ требует применения в процессе калибровки как минимум еще одного вещества.

Колебания датчика Кориолиса в первом приближении рассматриваются как гармонические. Увеличение амплитуды колебаний позволяет более точно определить величину силы Кориолиса. Если жесткость системы уменьшается с увеличением амплитуды, то колеблющаяся трубка имеет «мягкую» характеристику, если же она растет, то колеблющаяся трубка обладает «жесткой» характеристикой нелинейной восстанавливающей силы. Наличие нелинейности ведет к тому, что в дифференциальном уравнении движения появляются члены, в описании которых амплитуда колебаний содержит степени, больше единицы. В таком случае замена $\sin(\alpha) = \alpha$, как в простом гармоническом колебании, неприемлема. Необходимо раскладывать функцию $\sin \varphi$ в степенной ряд $d^2\varphi/dt^2 + \omega_0^2\varphi = -e_1\omega^3 - e_2\varphi^5$, при учете нелинейных членов пятого порядка погрешность измерений не превышает тысячной доли процента [20].

Широкий температурный диапазон внешней среды и измеряемого вещества наряду с различным влиянием каждого элемента конструкции на температурную погрешность существенно усложняет корректирующую процедуру. Необходимо учитывать не только абсолютную температуру каждого элемента, но и его вес, а также ее градиент между всеми элементами. В результате измеренные значения корректируют с учетом температурного изменения модуля упругости, механического напряжения измерительной трубки и плотности протекающего материала.

Также необходимо учитывать влияние температуры тела на испытываемую им силу тяжести. Так как приращение Δg ускорения силы тяжести в первом приближении пропорционально ускорению действующих на тело внешних упругих сил, величина и знак Δg зависят от направления вектора ускорения. При влиянии упругих сил на силу тяжести появляется зависимость силы тяготения, приложенной к пробному телу, от температуры тела. При изменении температуры тела на 11 К/мин мы получаем изменение массы на $3,43 \text{ мг/мин}$ [21].

Также следует отметить ряд причин, влияние которых на технические характеристики расходомера либо учитывают только через средние значения, либо не учитывают. Поскольку расходомер устанавливается на различных участках трубопроводов, при каждом монтаже всегда будет различное абсолютное среднее значение механического напряжения измерительной трубки. Кроме того, моменты усилия, с которым крепятся фланцы расходомера, различаются как по значению, так и по распределению этого момента по окружности фланца. Следовательно, подвеска обеих сторон расходомера практически всегда несимметрична.

Учитывая, что крепление также не идеально жесткое, т.е. не полностью гасит переменные силы и моменты (в местах крепления не образуются чистые узлы колебаний), происходит ассиметричный обмен энергией с трубопроводом. Кроме того, все изменения состояния внешнего трубопровода (начиная от температурных и кончая вибрациями) ассиметричным образом влияют на точность изменений.

Как уже упоминалось, резонансная частота (возбуждения) имеет значение порядка 300 Гц, т.е. близка к промышленной частоте. Следовательно, весь спектр внешних шумов, лежащий в полосе резонанса, усиливается с тем же коэффициентом, что и полезный сигнал.

Заключение

Разработанные в рамках проведенного исследования модели показали, что внешние воздействия оказывают значительный негативный вклад в точность определения параметров потока жидкости. Данный недостаток практически невозможно устранить имеющимися методами цифровой обработки сигналов, так как частота работы расходомера совпадает с зоной промышленных шумов. Большинство разработок направлены на повышение частоты работы расходомера, для преодоления верхнего порога зоны промышленных шумов в 500 Гц [22]. Но на данном этапе развития техники и технологий данную частоту работы расходомера невозможно достичь для всех типов, размеров и конструкций кориолисовых расходомеров [23, 24].

Библиографический список

1. Schweiger, R. Methods for calibration of a mass flowmeter for supercritical helium, Advances / R. Schweiger, A. Singer, I. Kühn, K. Johst // Cryogenic Engineering. – 1991. – № 37. – P. 147–154.
2. Yang, W. Q. Role of tomography in gas/solids flow measurement / W. Q. Yang, S. Liu // Flow Measurement & Instrumentation. – 2000. – № 11 (3). – P. 237–244.
3. Xu, K. A signal processing method for Coriolis mass flowmeter based on time-varying signal model and lattice notch filter / K. Xu, W. Ni, Z. Chen // Chinese Journal of Scientific Instrument. – 2006. – № 27 (2). – P. 596–601.
4. Ni, W. A signal processing method for Coriolis flowmeter based on time-varying signal model and normalized lattice notch filter / W. Ni, K. Xu // Acta Metrologica Sinica. – 2007. – № 28 (3). – P. 243–247.
5. Tu, Y. Frequency tracking method and simulation for Coriolis Mass Flowmeter based on new adaptive notch filter / Y. Tu, F. Su, T. Shen, H. Zhang // Journal of Chongqing University. – 2011. – № 34 (10). – P. 147–152.
6. Svete, A. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters / A. Svete, J. Kutin, G. Bobovnik, I. Bajsić // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – № 352. – P. 30–45.
7. Development of Coriolis mass flowmeter with digital drive and signal processing technology / Q. Hou, K. Xu, M. Fang, C. Liu, W. Xiong // ISA Transactions. – 2013. – № 52 (5). – P. 692–700.
8. Yang, H. Phase difference measuring method based on SVD and Hilbert transform for Coriolis mass flowmeter. Chinese / H. Yang, Y. Tu, H. Zhang, P. Yi // Journal of Scientific Instrument. – 2012. – № 33 (9). – P. 2101–2107.
9. Signal processing for Coriolis mass flowmeter based on Hilbert transform / W. Liu, L. Zhao, K. Wang, Z. Feng, Q. Long // Acta Metrologica Sinica. – 2013. – № 34 (5). – P. 446–451.
10. So, H. C. A comparative study of two discrete-time phase delay estimators / H. C. So // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – № 54 (6). – P. 2501–2504.
11. Shanmugavalli, M. Smart Coriolis mass flowmeter / M. Shanmugavalli, M. Umapathy, G. Uma // Measurement. – 2010. – № 43 (4). – P. 549–555.
12. Yang, H. A frequency tracking method based on improved adaptive notch filter for coriolis mass flowmeter / H. Yang, Y. Tu, H. Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – № 128–129. – P. 450–456.
13. Xu, K.-J. A lattice notch filter based signal processing method for coriolis mass flowmeter / K.-J. Xu, W. Ni // Acta Metrologica Sinica. – 2005. – № 26 (1). – P. 49–52.
14. Vucijak, N. M. A simple algorithm for the estimation of phase difference between two sinusoidal voltages / N. M. Vucijak, L. V. Saranovac // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – № 59 (12). – P. 3152–3158.
15. Hall, R. Measuring mass flow and density with Coriolis meters / R. Hall // InTech. – 1990. – № 37 (4). – P. 45–46.

16. *Sharma, S. C.* Performance evaluation of an indigenously designed copper (U) tube Coriolis mass flow sensors / S. C. Sharma, P. P. Patil, M. A. Vasudev, S. C. Jain // *Measurement*. – 2010. – № 43 (9). – P. 1165–1172.
17. Imitation modelling for the subsystem of identification and structuring data of signal sensors / M. Yu. Mikheev, T. V. Zhashkova, E. N. Meshcheryakova, K. V. Gudkov, A. K. Grishko // *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS*. – 2016. – 7807748.
18. Гудков, К. В. Способ автоматической поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации / К. В. Гудков, М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // *Измерительная техника*. – 2012. – № 2. – С. 29–32.
19. Александров, В. С. Макроскопические флуктуации плотности воды / В. С. Александров, Л. А. Баденко, В. С. Снегов // *Измерительная техника*. – 2004. – № 3. – С. 54–56.
20. Хомяков, Г. Д. Государственный первичный эталон единицы массового расхода жидкости / Г. Д. Хомяков, А. Г. Сафин, Н. В. Комиссаров // *Измерительная техника*. – 2003. – № 10. – С. 3–6.
21. Дмитриев, А. Л. Влияние температуры тела на его вес / А. Л. Дмитриев, Е. М. Никущенко, В. С. Снегов // *Измерительная техника*. – 2003. – № 2. – С. 8–11.
22. *Pereira, M.* Flow meters: Part 1 / M. Pereira // *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. – 2009. – № 12 (1). – P. 18–26.
23. Михеев, М. Ю. Системы поверки кориолисовых расходомеров / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // *Измерительная техника*. – 2012. – № 8. – С. 51–54.
24. Патент 2380660 РФ, МПК G01F 25/00, G01F 1/84. Способ повышения точности проверки расходомера / Михеев М. Ю., Юрманов В. А., Гудков К. В., Куц А. В., Володин К. И. ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. техн. акад. – № 2007129984/28 ; заявл. 06.08.2007 ; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 18 с.

References

1. Schweiger R., Singer A., Kühn I., Johst K. *Cryogenic Engineering*. 1991, no. 37, pp. 147–154.
2. Yang W. Q., Liu S. *Flow Measurement & Instrumentation*. 2000, no. 11 (3), pp. 237–244.
3. Xu K., Ni W., Chen Z. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2006, no. 27 (2), pp. 596–601.
4. Ni W., Xu K. *Acta Metrologica Sinica*. 2007, no. 28 (3), pp. 243–247.
5. Tu Y., Su F., Shen T., Zhang H. *Journal of Chongqing University*. 2011, no. 34 (10), pp. 147–152.
6. Svete A., Kutin J., Bobovnik G., Bajsić I. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, no. 352, pp. 30–45.
7. Hou Q., Xu K., Fang M., Liu C., Xiong W. *ISA Transactions*. 2013, no. 52 (5), pp. 692–700.
8. Yang H., Tu Y., Zhang H., Yi P. *Journal of Scientific Instrument*. 2012, no. 33 (9), pp. 2101–2107.
9. Liu W., Zhao L., Wang K., Feng Z., Long Q. *Acta Metrologica Sinica*. 2013, no. 34 (5), pp. 446–451.
10. So H. C. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2005, no. 54 (6), pp. 2501–2504.
11. Shanmugavalli M., Umapathy M., Uma G. *Measurement*. 2010, no. 43 (4), pp. 549–555.
12. Yang H., Tu Y., Zhang H. *Applied Mechanics and Materials*. 2012, no. 128–129, pp. 450–456.
13. Xu K.-J., Ni W. *Acta Metrologica Sinica*. 2005, no. 26 (1), pp. 49–52.
14. Vucijak N. M., Saranovac L. V. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010, no. 59 (12), pp. 3152–3158.
15. Hall R. *InTech*. 1990, no. 37 (4), pp. 45–46.
16. Sharma S. C., Patil P. P., Vasudev M. A., Jain S. C. *Measurement*. 2010, no. 43 (9), pp. 1165–1172.
17. Mikheev M. Yu., Zhashkova T. V., Meshcheryakova E. N., Gudkov K. V., Grishko A. K. *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS*. 2016, 7807748.

18. Gudkov K. V., Mikheev M. Yu., Yurmanov V. A., Yurkov N. K. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2012, no. 2, pp. 29–32. [In Russian]
19. Aleksandrov V. S., Badenko L. A., Snegov V. S. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2004, no. 3, pp. 54–56. [In Russian]
20. Khomyakov G. D., Safin A. G., Komissarov N. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2003, no. 10, pp. 3–6. [In Russian]
21. Dmitriev A. L., Nikushchenko E. M., Snegov V. S. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2003, no. 2, pp. 8–11. [In Russian]
22. Pereira M. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. 2009, no. 12 (1), pp. 18–26.
23. Mikheev M. Yu., Gudkov K. V., Yurmanov V. A., Yurkov N. K. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2012, no. 8, pp. 51–54. [In Russian]
24. Patent 2380660 RF, МПК G01F 25/00, G01F 1/84. *Sposob povysheniya tochnosti pro-verki raskhodomera* [Patent 2380660 of the Russian Federation, IPC G01F 25/00, G01F 1/84. Method for improving the accuracy of flow meter verification]. Mikheev M. Yu., Yurmanov V. A., Gudkov K. V., Kuts A. V., Volodin K. I.; applicant and patent holder Penza State Technological Academy. № 2007129984/28; appl. 06.08.2007; publ. 27.01.2010, Bull. no. 3, 18 p. [In Russian]

Гудков Кирилл Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: gudkovk.pgta@gmail.com

Gugkov Kirill Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova passage /Gagarina street,
Penza, Russia)

Пискаев Кирилл Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: PiskaevK@gmail.com

Piskaev Kirill Yur'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova passage /Gagarina street,
Penza, Russia)

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ярославцева Дарья Александровна

аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna

postgraduate student,
design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Гудков, К. В. Имитационное моделирование составных частей информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей / К. В. Гудков, К. Ю. Пискаев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 64–75. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-8.