

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ ЗА СЧЕТ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ

© 2025 О.Л. Ибряева, А.Д. Яковенко, В.В. Синицин, А.Л. Шестаков

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: ibriaevaol@susu.ru, iakovenkoad@susu.ru, sinitsinvv@susu.ru, a.l.shestakov@susu.ru

Поступила в редакцию: 22.08.2025

В статье рассматривается задача повышения точности вихреакустических расходомеров за счет высокоточной оценки частоты вихреобразования в условиях коротких временных окон и зашумленных сигналов. Традиционные методы, основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ), сталкиваются с фундаментальным ограничением разрешения при анализе коротких интервалов, что снижает их эффективность в динамических режимах измерений. В качестве альтернативы предложен модифицированный метод матричных пучков (ММП), относящийся к параметрическим методам высокого разрешения. Метод позволяет моделировать сигнал как сумму комплексных экспонент и обеспечивает устойчивую оценку частоты даже при низком отношении сигнал/шум. Проведено сравнение ММП и БПФ на модельных и экспериментальных сигналах с вихреакустического расходомера. Показано, что ММП обеспечивает более стабильные оценки частоты: стандартное отклонение уменьшается в среднем в 1.5 раза. При этом вычислительная сложность метода оказывается сопоставимой или даже ниже за счет малой длины анализируемых окон. Полученные результаты демонстрируют потенциал ММП для создания алгоритмов автоматического контроля достоверности показаний средств измерений. Метод может быть положен в основу систем самодиагностики и коррекции погрешностей, вызванных нестационарностью потока, вибрациями или наличием двухфазного течения.

Ключевые слова: вихреакустический расходомер, оценка частоты, метод матричных пучков, высокое разрешение, обработка сигналов, достоверность измерений, двухфазный поток, параметрические методы.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ибряева О.Л., Яковенко А.Д., Синицин В.В., Шестаков А.Л. Повышение точности показаний вихреакустических расходомеров за счет высокоточной оценки частоты вихреобразования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2025. Т. 14, № 3. С. 42–58. DOI: 10.14529/cmse250303.

Введение

Измерение расхода жидкостей и газов является одной из ключевых задач в нефтегазовой, энергетической, химической и пищевой промышленности. Среди разнообразия средств измерений вихреакустические расходомеры занимают особое место благодаря своей простоте, надежности и отсутствию движущихся частей. Принцип их работы основан на явлении периодического срыва вихрей Кармана за телом обтекания, частота которых прямо пропорциональна скорости потока. Точное определение этой частоты является основой высокой метрологической точности прибора.

Однако в реальных условиях измерительный сигнал подвержен шумам, вибрациям и нестационарности, что затрудняет точную оценку частоты, особенно при необходимости высокого временного разрешения. Традиционные методы спектрального анализа, такие как

быстрое преобразование Фурье (БПФ), обладают фундаментальным ограничением: разрешение по частоте обратно пропорционально длительности анализируемого интервала. Это означает, что при коротких окнах анализа, необходимых для отслеживания быстрых изменений расхода, точность оценки частоты резко падает.

Для преодоления этого ограничения все большее внимание привлекают параметрические методы высокого разрешения, способные оценивать частоту сигнала с высокой точностью даже на малых интервалах наблюдения. К ним относится метод матричных пучков (Matrix Pencil Method, МРМ, ММП), позволяющий моделировать сигнал как сумму комплексных экспонент и находить его параметры с помощью разложения структурированных матриц. В работе [1] предложена его модификация, повышающая устойчивость к шуму за счет критерия согласованности полюсов и обратных к ним.

Актуальность данной работы обусловлена задачей обеспечения достоверности показаний средств измерений в условиях цифровой промышленности. Поскольку расход вычисляется на основе измеренной частоты вихреобразования, любая погрешность в ее оценке напрямую влияет на точность конечного результата. Более того, в условиях нестационарных процессов, пульсирующих потоков или внешних помех, традиционные методы могут давать систематические ошибки, что ставит под сомнение достоверность измерений. В этом контексте разработка методов высокоточной обработки сигнала становится ключевым элементом автоматического контроля достоверности и коррекции результатов измерений — одной из центральных задач современных цифровых измерительных систем.

В работе проведено исследование модифицированного метода матричных пучков как инструмента повышения точности и устойчивости оценки частоты. Показано, что применение ММП позволяет существенно снизить разброс оценок частоты по сравнению с БПФ, особенно при коротких временных окнах, что напрямую способствует повышению метрологической надежности расходомера. Полученные результаты могут быть использованы для построения алгоритмов самодиагностики и автоматической коррекции показаний в «умных» измерительных системах.

Цель данной работы — исследование эффективности модифицированного метода матричных пучков для обработки сигналов вихреакустического расходомера в сравнении с классическим подходом на основе БПФ. Проведено сопоставление методов на модельных и экспериментальных данных, включая оценку точности, стабильности и вычислительной сложности в условиях коротких окон анализа.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 представлен обзор современных подходов к обработке сигналов в вихревых расходомерах. В разделе 2 описан принцип работы вихреакустического расходомера и поставлена задача оценки частоты вихреобразования. Раздел 3 посвящен изложению модифицированного метода матричных пучков. В разделе 4 представлены результаты моделирования и обработки реальных сигналов. В заключении подведены итоги и обозначены направления дальнейших исследований.

1. Обзор литературы

Вихреакустические расходомеры занимают важное место среди средств измерений благодаря своей простоте, надежности и отсутствию движущихся частей [2]. Однако их метрологические характеристики могут существенно ухудшаться под влиянием внешних и внутренних факторов, таких как шум, вибрации, нестационарность потока и, что особенно важ-

но, нарушение однородности среды — например, при наличии газовых включений в жидком потоке.

В условиях однофазного потока и при стабильных гидродинамических режимах вихревые расходомеры демонстрируют высокую точность [3]. Однако в реальных промышленных системах часто возникают двухфазные режимы течения: пузырьковый, пробковый, туманный и др., которые нарушают структуру вихревого следа и приводят к систематическим погрешностям измерений [4]. Как показано в работе [4], даже при низком объемном содержании газа (1–8%) происходит изменение частоты вихреобразования и снижение энергии вихревого сигнала, что обусловлено как искажением формы вихрей, так и снижением амплитуды пульсаций давления. Эти эффекты делают классическую калибровку прибора неадекватной и требуют введения поправок. Данный вывод подтверждается результатами моделирования, показывающими, что наличие вихря вблизи приемопередатчика может вызывать ошибку в измерении инструментального коэффициента до 17% [5].

Для компенсации погрешностей предлагаются различные подходы [4, 6, 7], не требующие изменения конструкции прибора, но предъявляющие повышенные требования к достоверности оценки частоты вихреобразования, поскольку любая ошибка в ее определении будет напрямую влиять на точность коррекции. В частности, для низких расходов (0.5–50 м³/ч) предлагается использование адаптивных алгоритмов на основе скользящего среднего и экспоненциального сглаживания [2, 8], а также методов, основанных на анализе стабильности частотной последовательности, а не мгновенных значений [9]. Последнее исследование [9] показывает, что коэффициент вариации частоты вихреобразования может достигать 3–9% в зависимости от режима течения, что подтверждает необходимость статистической обработки данных и проверки их на нормальность.

Традиционно для анализа сигнала в вихревых расходомерах применяется быстрое преобразование Фурье, обеспечивающее устойчивую работу в стационарных режимах [10]. Однако его применение в условиях коротких временных окон, шумов или нестационарности ограничено из-за фундаментального компромисса между временным и частотным разрешением. Для повышения точности в ряде работ используются методы интерполяции спектральных пиков [11, 12], однако их эффективность резко падает при низком отношении сигнал/шум. Альтернативой является адаптивное использование автокорреляции для низких частот (<200 Гц) и БПФ для высоких частот (>200 Гц) в сочетании с перестраиваемым цифровым полосовым фильтром, что позволяет достигать ошибки измерения менее 0.3% на средних и высоких расходах и около 1.1% на самых низких расходах, хотя и с задержкой оценки около 0.512 с при резких изменениях потока [13].

В этих условиях все большее внимание привлекают параметрические методы высокого разрешения, способные оценивать частоту сигнала с высокой точностью даже на коротких интервалах. К ним относятся метод Прони [14], MUSIC [15], ESPRIT [16] и метод матричных пучков [17]. Эти методы моделируют сигнал как сумму затухающих синусоид и позволяют достигать сверхразрешения за счет использования структуры сигнального подпространства. В частности, ММП отличается относительной простотой реализации и хорошей устойчивостью к шуму при корректном выборе параметров. Также применяются такие методы, как периодограмма и оценка спектральной плотности Уэлча [18], преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang Transform) и эмпирическая модовая декомпозиция для выделения слабых вихревых сигналов на низких расходах [19].

Однако в условиях сильного шума часть оцененных полюсов может быть ложной. Для повышения надежности в [1] предложена модификация ММП, основанная на критерии согласованности оценок для полюсов и обратных к ним. Этот подход позволяет эффективно подавлять шумовые компоненты и повышать достоверность оценки частоты, что особенно важно в условиях ослабленного сигнала, как в случае двухфазного потока [4].

Кроме того, в работах [20–22] показано, что сигнал вихреобразования может использоваться не только для измерения расхода, но и для распознавания режимов течения с помощью вейвлет-анализа, эмпирической модовой декомпозиции и нейронных сетей. Это открывает путь к созданию интеллектуальных расходомеров, способных не только измерять, но и диагностировать состояние потока.

Важным аспектом является также аппаратное улучшение метрологических характеристик. Показано, что оптимизация геометрии обтекаемого тела в ультразвуковых вихревых расходомерах может привести к 12-кратному повышению чувствительности [23], а использование аналогового предварительного фильтра для пьезоэлектрических датчиков — к значительному подавлению шумов [24].

Таким образом, существует четкая тенденция к переходу от простых измерительных приборов к системам с автоматическим контролем достоверности показаний, и в этом контексте высокоточная оценка частоты вихреобразования с помощью модифицированного ММП может служить основой для алгоритмов самодиагностики и коррекции показаний.

2. Принцип работы вихреакустического расходомера

Вихреакустические расходомеры широко применяются для измерения расхода жидких и газообразных сред благодаря простоте конструкции, отсутствию движущихся частей и высокой надежности. Принцип их работы основан на регистрации колебаний, возникающих вследствие генерации вихрей Кармана за обтекателем в потоке. Типичный расходомер представляет собой моноблочную конструкцию (рис. 1), состоящую из проточной части и электронного блока [25].

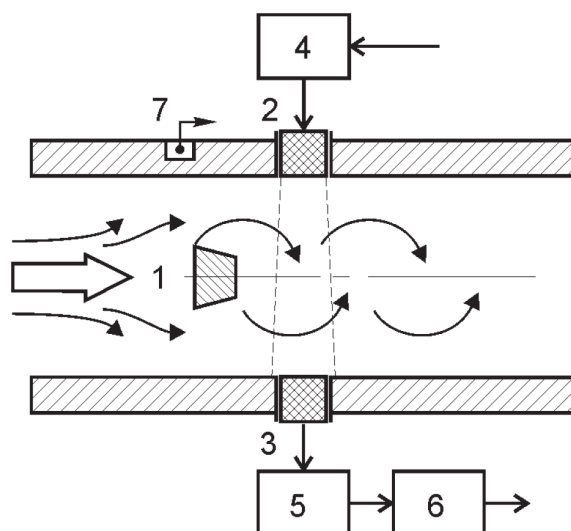


Рис. 1. Устройство расходомера: 1 — тело обтекания, 2 — пьезоизлучатель, 3 — пьезоприемник, 4 — генератор, 5 — фазовый детектор, 6 — блок формирования выходных сигналов, 7 — термодатчик

При обтекании потоком жидкости тела обтекания, за ним формируется вихревая дорожка, причем частота f пульсаций давления газа или жидкости в результате периодического срыва вихрей прямо пропорциональна скорости потока v , а, следовательно и расходу. Справедлива формула [3]:

$$f = Sh \cdot \frac{v}{d},$$

где Sh — число Струхала (безразмерный коэффициент, зависящий от формы тела), d — характерный размер тела обтекания.

От генератора на пьезоизлучатель подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. При прохождении через поток, в результате взаимодействия с вихрями, ультразвуковые колебания модулируются по фазе. На пьезоприемнике модулированные ультразвуковые колебания вновь преобразуются в напряжение, которое подается на фазовый детектор.

На фазовом детекторе определяется разность фаз между сигналами с пьезоприемника и опорного генератора для однолучевых расходомеров (или сигналами с пьезоприемников первой и второй пары пьезоэлементов для двухлучевых расходомеров). Напряжение на выходе фазового детектора является практически синусоидальным сигналом с частотой, прямо пропорциональной скорости потока. Таким образом, задача точного определения частоты синусоидального вихреакустического сигнала является ключевым этапом измерительного процесса.

Традиционные методы спектрального анализа, основанные на быстром преобразовании Фурье, обладают рядом ограничений при решении этой задачи. В частности, существует фундаментальный компромисс между длительностью анализируемого окна и разрешением по частоте: сокращение окна, необходимое для повышения быстродействия измерений, неизбежно приводит к снижению точности определения частоты. Дополнительно на результаты влияют шум и возможные дрейфы частоты сигнала в пределах измерительного интервала.

Для преодоления этих ограничений целесообразно использовать методы высокоточного спектрального анализа, способные обеспечивать устойчивую оценку частоты на коротких временных интервалах. Перейдем к описанию одного из таких методов.

3. Модифицированный метод матричных пучков

Метод матричных пучков (Matrix Pencil Method, МРМ, ММП) относится к параметрическим методам спектрального анализа, моделирующим сигнал как сумму комплексных экспонент:

$$x(n) = \sum_{k=1}^M R_k z_k^n,$$

где $R_k = A_k e^{j\varphi_k}$ — комплексные амплитуды, $z_k = e^{(\alpha_k + j2\pi f_k)T}$ — полюсы сигнала, T — период дискретизации, α_k — коэффициенты затухания, f_k — частоты гармоник.

В случае вихреакустического расходомера полезный сигнал на коротком интервале можно аппроксимировать одной доминирующей затухающей синусоидой, соответствующей основной частоте вихрей Кармана.

Классический ММП находит полюса z_k как собственные значения пучка матриц, сформированного из отсчетов сигнала. При отсутствии шума эти полюса дают точные оценки частоты и затухания синусоид. Однако в присутствии шума часть найденных полюсов будет

не связана с полезным сигналом. Чтобы отделить истинные полюса от ложных, в работе [1] был предложен модифицированный ММП, в котором дополнительно вычисляются оценки для обратных полюсов $1/z_k$.

Приведем основные этапы алгоритма.

1. Из N отсчетов сигнала $x(n)$ формируются две матрицы:

$$Y_0 = \begin{bmatrix} x(L-1) & x(L-2) & \dots & x(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-2) & x(N-3) & \dots & x(N-L-1) \end{bmatrix},$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} x(L) & x(L-1) & \dots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(N-L) \end{bmatrix}.$$

Параметр L выбирается в диапазоне $N/3 \leq L \leq 2N/3$. Показано [17], что при таком выборе дисперсия оценки полюсов z_k будет минимальна, т.е. ММП будет наименее чувствителен к шуму. Оказывается [1], что собственными числами пучков матриц $Y_0 - \lambda Y_1$, $Y_1 - \lambda Y_0$ будут z_k , $1/z_k$, соответственно. На этом факте и основан описываемый метод.

2. Находим усеченное до ранга M сингулярное разложение $Y_0 = U_0 S_0 V_0^H$. Число M определяется по числу ненулевых сингулярных чисел. В случае зашумленного сигнала ненулевых сингулярных чисел не будет, однако между первыми M и последующими сингулярными числами будет наблюдаться ярко выраженный скачок, который и позволит определить число комплексных экспонент в сигнале. Аналогично находим $Y_1 = U_1 S_1 V_1^H$.

3. Составляем матрицы:

$$Z_E = S_0^{-1} U_0^H Y_1 V_0,$$

$$Z_I = S_1^{-1} U_1^H Y_0 V_1.$$

для оценки полюсов z_k и $1/z_k$, соответственно.

4. Находим собственные числа p_k, q_m матриц Z_E, Z_I и получаем тем самым оценки для полюсов z_k и $1/z_k$.
5. Определяем истинные полюсы сигнала следующим образом.

Для каждого p_k выполняется поиск q_m , такое что:

$$\left| p_k - \frac{1}{q_m} \right| \leq \varepsilon.$$

Если условие выполняется — полюс p_k признается истинным.

6. Находим частоту: $f_k = \frac{\arg(p_k)}{2\pi T}$.

Далее применим описанный метод к анализу модельного и реального сигнала с вихре-акустического расходомера.

4. Экспериментальная часть

4.1. Анализ модельного сигнала

В этом параграфе мы сравним точность оценки частоты синусоидального сигнала классическим спектральным анализом на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) и модифицированным методом матричных пучков (ММП). В качестве тестового сигнала рас-

смотрим синусоиду с известной частотой $f_0 = 115$ Гц, дискретизированную с частотой $F_s = 2$ кГц и зашумленную аддитивным белым шумом с дисперсией, соответствующей отношению сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio) около 7.5 дБ:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right).$$

Здесь $P_s = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L s^2[n]$ — мощность полезного сигнала, $P_n = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L w^2[n]$ — мощность шума, $s[n]$ — отсчеты полезного сигнала, $w[n]$ — отсчеты шума, L — число отсчетов сигнала. В качестве шума брались значения нормальной случайной величины с нулевым средним.

Длительность сигнала составляет 10 секунд. На рис. 2 приведен фрагмент в 0.1 секунды рассматриваемого сигнала.

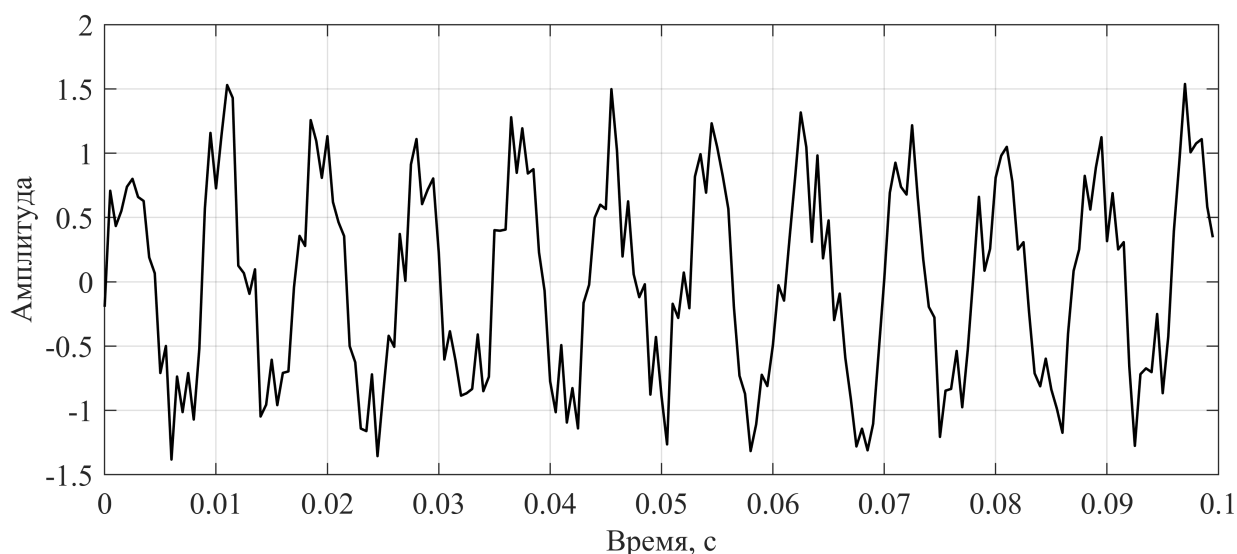


Рис. 2. Фрагмент модельного сигнала

Сравнение методов выполнялось в режиме скользящего окна для различных длительностей окна в диапазоне от 0.025 до 0.3 с. Для каждого значения длительности окна вычислялись среднее значение оценки частоты:

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i,$$

и среднеквадратичная ошибка $RMSE$ (Root Mean Squared Error) относительно истинной частоты $f_0 = 115$ Гц:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - f_0)^2}.$$

Здесь N — количество окон, f_i — оценка частоты в i -м окне.

Чтобы методу БПФ было легче «конкурировать» с ММП, для уточнения оценки частоты между дискретными бинами БПФ применялась параболическая интерполяция положения пика спектра. Если α, β, γ — амплитуды спектра в соседних частотных бинах (левом, максимальном и правом), то смещение пика относительно центрального бина оценивается как:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha - \gamma}{\alpha - 2\beta + \gamma}$$

и уточненная оценка частоты $\hat{f}$ определяется по формуле:

$$\hat{f} = f_{bin} + p \cdot \frac{F_s}{N_{FFT}},$$

где f_{bin} — частота бина с максимумом, N_{FFT} — число точек, используемое в вычислении БПФ и определяющее частотное разрешение спектра: $\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}}$. Чем больше N_{FFT} , тем мельче частотный шаг и тем точнее можно определить частоту пика, но тем выше вычислительные затраты. В нашем эксперименте $N_{FFT} = 8192$.

На рис. 3 приведены отклонения среднего значения частоты $\bar{f} - f_0$ и $RMSE$ в зависимости от длины скользящего окна.

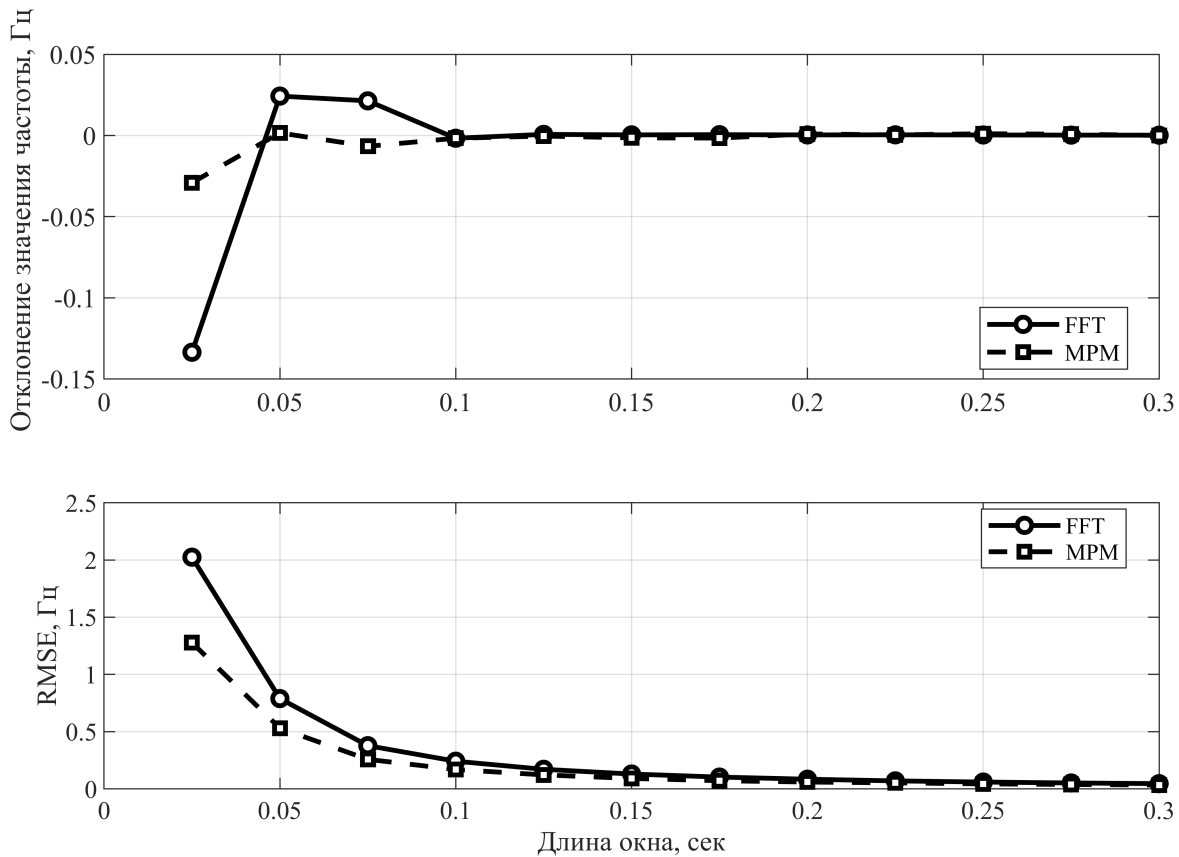


Рис. 3. К сравнению методов Фурье и ММП на модельном сигнале

Как можно видеть, при длительности окна менее 0.1 с модифицированный метод матричных пучков обеспечивает существенно более высокую точность оценки частоты по сравнению с классическим методом БПФ. Для коротких временных интервалов ММП демонстрирует меньшую систематическую погрешность и заметно более низкое значение $RMSE$, что указывает на его лучшую устойчивость к влиянию шума и малого времени наблюдения. В контексте вихреакустических расходомеров такая особенность особенно важна при необходимости отслеживания быстрых изменений расхода, когда доступные интервалы анализа ограничены.

4.2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования вихреакустического расходомера проводились на поверочной установке, предназначенной для высокоточного измерения расхода жидкостей (рис. 4). Установка реализует два независимых метода измерения: весовой метод и метод непосредственного сличения с эталонными расходомерами, что позволяет охватить диапазон расходов от 0.0025 до 750 м³/ч. Рабочей средой является вода с температурой от 10 до 30 °С, соответствующая нормированным показателям по мутности, общей жесткости и со-лесодержанию.



Рис. 4. Экспериментальная установка

Конструктивно установка включает систему хранения и подачи воды с накопительной емкостью 15 м³, систему создания и стабилизации расхода на основе центробежных насосов с частотным регулированием, а также комплекс эталонных средств измерений. В качестве первичных эталонов используются четыре весоизмерительных устройства с пределами взвешивания 2, 20, 200 и 4500 кг и девять массовых корнолисовых расходомеров с диаметрами условных проходов от 5 до 150 мм. Точность измерения массы весовым методом составляет $\pm 0.05\%$, а при использовании эталонных расходомеров — $\pm 0.15\%$.

Принцип работы установки основан на объемно-временном методе измерения расхода. При весовом методе масса жидкости, прошедшей через поверяемый прибор, измеряется с помощью электронных весов, после чего пересчитывается в объем с учетом температуры и плотности воды. При методе сличения показания поверяемого прибора сравниваются в реальном времени с данными эталонного расходомера, при этом сигнал от эталона используется в цепи обратной связи частотного преобразователя для стабилизации расхода с точностью $\pm 0.5\%$.

На экспериментальной установке были проведены измерения для двух стабильных режимов течения: сигнал 1 был получен при расходе 110 м³/ч, а сигнал 2 — при расходе

4 м³/ч. Стабильность расходов обеспечивалась системой частотного регулирования насосов и контролировалась комплектом эталонных кориолисовых расходомеров.

4.3. Анализ экспериментальных сигналов

Сигналы, полученные с вихреакустического расходомера, имели частоту дискретизации $Fs = 200$ кГц, что избыточно для целевого анализа частотного диапазона вихреобразования, который обычно составляет около 5–150 Гц, и существенно увеличивает объем вычислений.

Поэтому сигналы были предварительно подвергнуты следующим этапам предобработки, направленным на снижение вычислительной нагрузки и повышение точности последующего анализа.

1. Поэтапная децимация в два шага: с 200 кГц до 20 кГц и с 20 кГц до 2 кГц. В обоих случаях использовалась функция ‘decimate’ Matlab со встроенным фильтром для подавления частот выше половины новой частоты дискретизации. Такой подход позволил избежать прямого масштабного понижения частоты дискретизации (с 200 кГц до 2 кГц за один шаг), что могло бы привести к ухудшению качества фильтрации из-за ограниченной крутизны фильтра.
2. После децимации был применен полосовой фильтр, пропускающий частоты в диапазоне 90–140 Гц для сигнала 1 с частотой вихреобразования около 115 Гц и фильтр с полосой 3–7 Гц для сигнала 2 с частотой около 5 Гц.

После предобработки были получены сигналы с частотой дискретизации $Fs = 2$ кГц и выделенной узкой полосой частот, содержащей основную гармонику вихреобразования. Такие сигналы используются как вход для методов БПФ и ММП в задаче трекинга частоты. Длительность сигналов составляет 12 секунд.

Дальнейшая обработка велась в режиме скользящего окна с фиксированным шагом и длиной окна, одинаковыми для обоих алгоритмов, что обеспечивало одинаковое количество частотных оценок. Для сигналов с частотами вихреобразования около 115 и 5 Гц были выбраны окна длительностью 0.02 и 0.4 секунды, соответственно, что составило около двух периодов синусоид.

После обработки всех окон для каждого метода вычислялись: среднее значение частоты $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$, стандартное отклонение $\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}$, а также суммарное время работы алгоритма. Полученные значения для двух экспериментальных сигналов приведены в таблице.

Таблица. Сравнение методов оценки частоты сигналов

Метод	Сигнал 1 (115 Гц)			Сигнал 2 (5 Гц)		
	$\bar{f}$, Гц	σ_f , Гц	t, с	$\bar{f}$, Гц	σ_f , Гц	t, с
БПФ	114.9697	3.4290	0.0497	4.9033	1.3515	0.0482
ММП	114.8548	2.7061	0.0201	4.8664	0.8937	0.0313

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что ММП обеспечивает более стабильные оценки частоты по сравнению с БПФ: стандартное отклонение σ_f для ММП ниже примерно в 1.5 раза. Это указывает на более высокую устойчивость метода к шумам и нестационарности в наблюдаемых данных.

Примечательно, что ММП демонстрирует выигрыш по точности при сопоставимой или даже меньшей вычислительной трудоемкости, несмотря на необходимость выполнения сингулярного разложения. Причиной является малый объем данных в пределах одного окна анализа, что делает матричные операции относительно дешевыми.

На рис. 5, 6 приведены временные реализации предобработанных экспериментальных сигналов и оценки частоты, полученные с помощью БПФ и ММП.

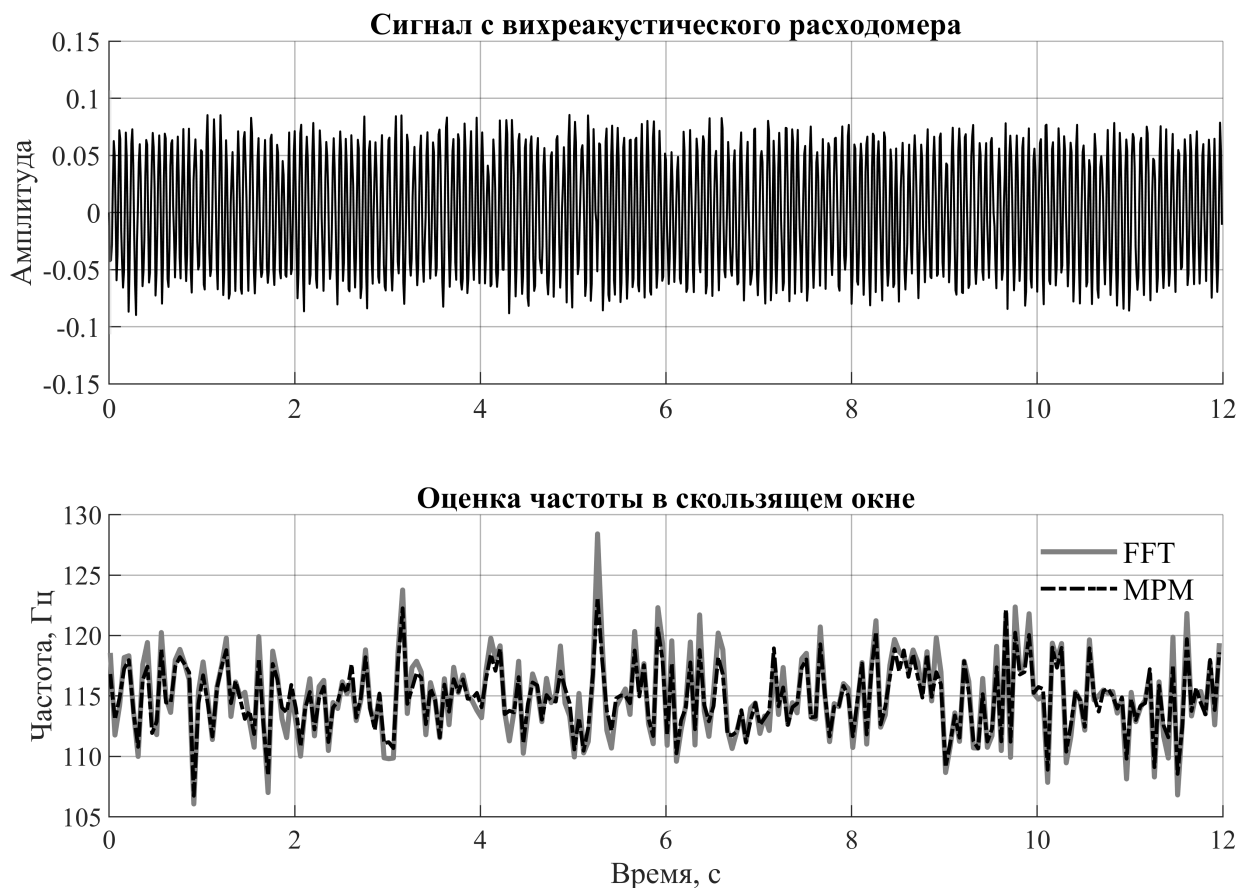


Рис. 5. Предобработанный сигнал 1 с вихреакустического расходомера и найденные значения частоты

Графический анализ подтверждает численные результаты: оба метода воспроизводят динамику изменения частоты вихреобразования, однако оценки ММП характеризуются меньшей разбросанностью, что особенно заметно при низкочастотных колебаниях (сигнал 2, рис. 6). Кроме того, временные зависимости подтверждают, что процесс вихреобразования носит нестационарный характер, а частота вихревого следа изменяется во времени.

Таким образом, в условиях ограниченной длины окон и умеренных вычислительных ресурсов ММП представляется предпочтительным методом для задач отслеживания точного значения частоты вихревых сигналов.

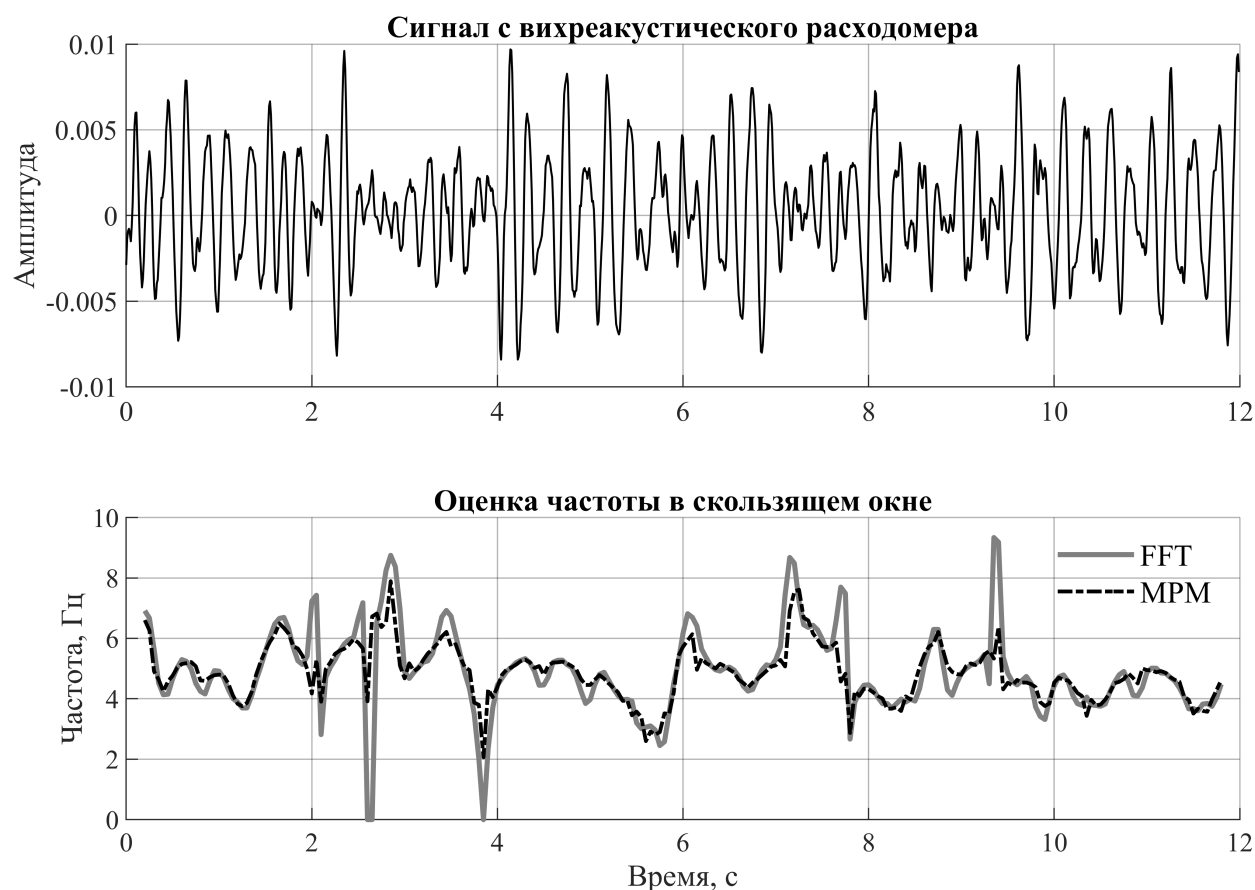


Рис. 6. Предобработанный сигнал 2 с вихреакустического расходомера и найденные значения частоты

Заключение

В данной работе рассмотрен принцип действия вихреакустических расходомеров, основанный на регистрации частоты вихрей Кармана, возникающих за телом обтекания в потоке. Показано, что точное и быстрое определение частоты вихреобразования является ключевой задачей, от решения которой зависит точность измерения расхода. Традиционные методы спектрального анализа, такие как быстрое преобразование Фурье, сталкиваются с фундаментальными ограничениями при работе на коротких временных интервалах, особенно в условиях шума и нестационарности сигнала.

В качестве альтернативы предложен модифицированный метод матричных пучков (ММП), относящийся к параметрическим методам высокого разрешения. Данный метод позволяет с высокой точностью оценивать частоту синусоидального сигнала даже при малой длительности аналитического окна, что особенно важно для отслеживания динамических изменений расхода в реальном времени.

Результаты моделирования и обработки реальных сигналов с вихреакустического расходомера показали, что модифицированный ММП превосходит классический БПФ по точности и устойчивости к шуму. При этом вычислительная сложность метода оказывается сопоставимой или даже ниже, благодаря эффективной обработке коротких выборок. Эксперименты подтвердили, что стандартное отклонение оценок частоты при использовании ММП снижается в среднем в 1.5 раза по сравнению с БПФ, что свидетельствует о более стабильной и надежной работе алгоритма в реальных условиях.

Таким образом, модифицированный метод матричных пучков представляет собой перспективный инструмент для цифровой обработки сигналов в системах измерения расхода, особенно в тех случаях, когда требуется высокая динамическая точность и малое время реакции. Его применение позволяет повысить метрологические характеристики вихреакустических расходомеров и расширить их функциональные возможности в составе современных систем автоматизации и управления технологическими процессами.

В дальнейшем представляется перспективным развитие алгоритма, включая его адаптацию к многокомпонентным сигналам, учет температурных и гидродинамических дрейфов, а также реализацию в виде встраиваемого программного обеспечения для микроконтроллеров, что сделает метод еще более пригодным для промышленного применения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований №FENU-2023-0010 (2023010ГЗ)).

Литература

1. Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 1. С. 26–37. DOI: 10.14529/cmse170102.
2. Venugopal A., Agrawal A., Prabhu S.V. Review on vortex flowmeter - designer perspective // Sensors and Actuators A: Physical. 2011. Vol. 170. P. 8–23. DOI: 10.1016/j.sna.2011.05.034.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник: Кн. 2. Спб: Политехника, 2004. 412 с.
4. Wang X., Lin S., Kang Y., *et al.* Simulation analysis of the influence of two-phase flow on the accuracy of the low-temperature vortex flowmeter // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2025. Vol. 47. P. 365. DOI: 10.1007/s40430-025-05679-7.
5. Sun Y., Zhang T., Zheng D. New analysis scheme of flow-acoustic coupling for gas ultrasonic flowmeter with vortex near the transducer // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 4. P. 1151. DOI: 10.3390/s18041151.
6. Sun H.-j., Huo C., Wang H.-x. The experimental research of vortex flowmeter in vertical upward gas-liquid two-phase flow. 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC). 2009. P. 167–170. DOI: 10.1109/IMTC.2009.5168437.
7. Sun Z. Mass flow measurement of gas-liquid bubble flow with the combined use of a Venturi tube and a vortex flowmeter // Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 21, no. 5. P. 055403. DOI: 10.1088/0957-0233/21/5/055403.
8. Shen H., Fu X., Chen J.-D., Ye P. development of a vortex flowmeter with good performance at low-flowrate. 15th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2010). 2010. Vol. 1. P. 524–530.
9. Miao J., Hu C., Chou J. Response of a vortex flowmeter to impulsive vibrations // Flow Measurement and Instrumentation. 2000. Vol. 11. P. 41–49. DOI: 10.1016/S0955-5986(99)00018-7.

10. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006. 1019 p.
11. Jacobsen E., Kootsookos P. Fast, accurate frequency estimators [DSP tips & tricks] // IEEE Signal Processing Magazine. 2007. Vol. 24, no. 3. P. 123–125. DOI: 10.1109/MSP.2007.361611.
12. Candan Ç. A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples // IEEE Signal Processing Letters. 2011. Vol. 18, no. 6. P. 351–354. DOI: 10.1109/LSP.2011.2136378.
13. Hans V., Windorfer H. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters // Measurement. 2003. Vol. 33. P. 121–133. DOI: 10.1016/S0263-2241(02)00057-X.
14. Prony G.R. Essai expérimental et analytique sur les lois de la dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool, à différentes températures // Journal de l'École Polytechnique. 1795. Vol. 1, no. 22. P. 24–76.
15. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34, no. 3. P. 276–280. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830.
16. Roy R., Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1989. Vol. 37, no. 7. P. 984–995. DOI: 10.1109/29.32276.
17. Hua Y., Sarkar T.K. On the total least squares linear prediction method for frequency estimation // IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1990. Vol. 38, no. 12. P. 2186–2189. DOI: 10.1109/29.61547.
18. Sun Z., Chen H., Chen Y. Application of periodogram and welch based spectral estimation to vortex frequency extraction // Proceedings - 2012 International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, ISDEA 2012. 2012. DOI: 10.1109/ISdea.2012.689.
19. Zheng D., Zhang T., Xing J., Jianqiang M. Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection // Measurement Science and Technology. 2007. Vol. 18. P. 2769. DOI: 10.1088/0957-0233/18/9/005.
20. Huang S., Yin J., Sun Z., *et al.* Characterization of gas-liquid two-phase flow by correlation dimension of vortex-induced pressure fluctuation // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 10307–10314. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2713458.
21. Huang S., Sun Z., Zhou T., *et al.* Application of time-frequency entropy from wake oscillation to gas-liquid flow pattern identification // Journal of Central South University. 2018. Vol. 25, no. 7. P. 1690–1700. DOI: 10.1007/s11771-018-3860-2.
22. Sun Z., Chen Y., Gong H. Classification of gas-liquid flow patterns by the norm entropy of wavelet decomposed pressure fluctuations across a bluff body // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23, no. 12. P. 125301. DOI: 10.1088/0957-0233/23/12/125301.
23. Hans V. New aspects of the arrangement and geometry of bluff bodies in ultrasonic vortex flow meters. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002. Vol. 2. P. 1661–1664. DOI: 10.1109/IMTC.2002.1007209.

24. Akresh M., Reindl L., Walker W. Improved vortex flow meter using pre-filter. 2008 2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSCS.2008.4746877.
25. Группа компаний Метран. Каталог СИ. Том 2. Датчики температуры. Расходомеры. Уровнемеры. URL: <https://metran.ru/journal/> (дата обращения: 12.08.2025).

Ибряева Ольга Леонидовна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИЛ технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Яковенко Артем Дмитриевич, аспирант, кафедра информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Синицин Владимир Владимирович, к.т.н., доцент, заместитель заведующего НИЛ технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Шестаков Александр Леонидович, профессор, д.т.н., президент Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse250303

IMPROVING THE ACCURACY OF VORTEX FLOWMETERS THROUGH HIGH-RESOLUTION ESTIMATION OF VORTEX SHEDDING FREQUENCY

© 2025 O.L. Ibryaeva, A.D. Yakovenko, V.V. Sinitcin, A.L. Shestakov

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: ibryaevaol@susu.ru, iakovenkoad@susu.ru, sinitcinvv@susu.ru, a.l.shestakov@susu.ru

Received: 22.08.2025

The paper addresses the problem of improving the accuracy of vortex flowmeters by means of high-resolution frequency estimation of vortex shedding under conditions of short observation intervals and noisy signals. Traditional methods based on the Fast Fourier Transform (FFT) face fundamental resolution limitations when analyzing short data segments, which reduces their effectiveness in dynamic measurement regimes. As an alternative, a modified Matrix Pencil Method (MPM) is proposed, belonging to the class of high-resolution parametric techniques. The method models the signal as a sum of complex exponentials and provides robust frequency estimation even at low signal-to-noise ratios. A comparative analysis of MPM and FFT was carried out using both simulated and experimental signals from a vortex flowmeter. It is shown that MPM provides more stable frequency estimates, with the standard deviation reduced by an average of 1.5 times. At the same time, the computational complexity of the method is comparable to or even lower than that of FFT due to the small size of the analysis windows. The results demonstrate the potential of MPM for developing algorithms of automatic metrological reliability control. The method can serve as a basis for self-diagnostic systems and correction of measurement errors caused by flow nonstationarity, vibrations, or two-phase flow conditions.

Keywords: vortex flowmeter, frequency estimation, matrix pencil method, high resolution, signal processing, measurement reliability, two-phase flow, parametric methods.

FOR CITATION

Ibryaeva O.L., Yakovenko A.D., Sinitcin V.V., Shestakov A.L. Improving the Accuracy of Vortex Flowmeters through High-Resolution Estimation of Vortex Shedding Frequency. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 42–58. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse250303.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Ibryaeva O.L., Salov D.D. Modification of the matrix pencil method using joint estimation of signal poles and their inverses. Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 26–37. DOI: 10.14529/cmse170102.
2. Venugopal A., Agrawal A., Prabhu S.V. Review on vortex flowmeter - designer perspective. Sensors and Actuators A: Physical. 2011. Vol. 170. P. 8–23. DOI: 10.1016/j.sna.2011.05.034.
3. Kremlevskii P.P. Flowmeters and counters of quantity of substances. Reference book: Vol. 2. St. Petersburg: Politekhnika, 2004. 412 p.
4. Wang X., Lin S., Kang Y., *et al.* Simulation analysis of the influence of two-phase flow on the accuracy of the low-temperature vortex flowmeter. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2025. Vol. 47. P. 365. DOI: 10.1007/s40430-025-05679-7.
5. Sun Y., Zhang T., Zheng D. New analysis scheme of flow-acoustic coupling for gas ultrasonic flowmeter with vortex near the transducer. Sensors. 2018. Vol. 18, no. 4. P. 1151. DOI: 10.3390/s18041151.
6. Sun H.-j., Huo C., Wang H.-x. The experimental research of vortex flowmeter in vertical upward gas-liquid two-phase flow. 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC). 2009. P. 167–170. DOI: 10.1109/IMTC.2009.5168437.
7. Sun Z. Mass flow measurement of gas-liquid bubble flow with the combined use of a Venturi tube and a vortex flowmeter. Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 21, no. 5. P. 055403. DOI: 10.1088/0957-0233/21/5/055403.
8. Shen H., Fu X., Chen J.-D., Ye P. Development of a vortex flowmeter with good performance at low-flowrate. 15th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2010). 2010. Vol. 1. P. 524–530.
9. Miao J., Hu C., Chou J. Response of a vortex flowmeter to impulsive vibrations. Flow Measurement and Instrumentation. 2000. Vol. 11. P. 41–49. DOI: 10.1016/S0955-5986(99)00018-7.
10. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006. 1019 p.
11. Jacobsen E., Kootsookos P. Fast, accurate frequency estimators [DSP tips & tricks]. IEEE Signal Processing Magazine. 2007. Vol. 24, no. 3. P. 123–125. DOI: 10.1109/MSP.2007.361611.

12. Candan C. A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples. *IEEE Signal Processing Letters*. 2011. Vol. 18, no. 6. P. 351–354. DOI: 10.1109/LSP.2011.2136378.
13. Hans V., Windorfer H. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters. *Measurement*. 2003. Vol. 33. P. 121–133. DOI: 10.1016/S0263-2241(02)00057-X.
14. Prony G.R. Experimental and analytical essay on the laws of the dilatability of elastic fluids and on the expansive force of water vapor and alcohol vapor at different temperatures. *Journal de l'École Polytechnique*. 1795. Vol. 1, no. 22. P. 24–76.
15. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. Vol. 34, no. 3. P. 276–280. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830.
16. Roy R., Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1989. Vol. 37, no. 7. P. 984–995. DOI: 10.1109/29.32276.
17. Hua Y., Sarkar T.K. On the total least squares linear prediction method for frequency estimation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1990. Vol. 38, no. 12. P. 2186–2189. DOI: 10.1109/29.61547.
18. Sun Z., Chen H., Chen Y. Application of periodogram and welch based spectral estimation to vortex frequency extraction. *Proceedings - 2012 International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, ISDEA 2012*. 2012. DOI: 10.1109/ISdea.2012.689.
19. Zheng D., Zhang T., Xing J., Jianqiang M. Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection. *Measurement Science and Technology*. 2007. Vol. 18. P. 2769. DOI: 10.1088/0957-0233/18/9/005.
20. Huang S., Yin J., Sun Z., *et al.* Characterization of gas-liquid two-phase flow by correlation dimension of vortex-Induced pressure fluctuation. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 10307–10314. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2713458.
21. Huang S., Sun Z., Zhou T., *et al.* Application of time-frequency entropy from wake oscillation to gas-liquid flow pattern identification. *Journal of Central South University*. 2018. Vol. 25, no. 7. P. 1690–1700. DOI: 10.1007/s11771-018-3860-2.
22. Sun Z., Chen Y., Gong H. Classification of gas-liquid flow patterns by the norm entropy of wavelet decomposed pressure fluctuations across a bluff body. *Measurement Science and Technology*. 2012. Vol. 23, no. 12. P. 125301. DOI: 10.1088/0957-0233/23/12/125301.
23. Hans V. New aspects of the arrangement and geometry of bluff bodies in ultrasonic vortex flow meters. *Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2002. Vol. 2. P. 1661–1664. DOI: 10.1109/IMTC.2002.1007209.
24. Akresh M., Reindl L., Walker W. Improved vortex flow meter using pre-filter. 2008 2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems. 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSCS.2008.4746877.
25. Metran group of companies. Catalog of measuring instruments. Volume 2. Temperature sensors. Flowmeters. Level gauges. URL: <https://metran.ru/journal/> (accessed: 12.08.2025).