



УДК 681.5.015.87

ПРОВЕРКА СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИМПУЛЬСОМ

*О.Ю. Бушнев, bushuevoi@susu.ru, Д.Д. Салов, salovdd@yandex.ru,
Е.С. Тугова, tugova.katya@mail.ru, Е.А. Бобков, wolfelder@mail.ru,*
Южно-Уральский государственный университет (НИИ), г. Челябинск

В настоящее время в промышленности возникает потребность в так называемых интеллектуальных средствах измерения, т.е. в датчиках с функцией метрологического самоконтроля или диагностики своего состояния (самодиагностики). В данной работе для диагностики состояния датчика давления предлагается использовать ультразвуковое зондирование. В корпус датчика встроено пьезокерамическое кольцо, на которое подается электрический сигнал, колебания кольца возбуждают собственные частоты конструкции преобразователя, их соотносят с опорными значениями. Для оценки частот собственных колебаний используется метод матричных пучков, этот метод способен отслеживать сразу несколько частот с большой точностью. Результаты исследования подтверждаются экспериментальными данными.

Ключевые слова: диагностика технического состояния, интеллектуальные датчики, метод матричных пучков

PRESSURE SENSOR VALIDATION BY ULTRASONIC IMPULSE

O.Yu. Bushuev, D.D. Salov, E.S. Tugova, E.A. Bobkov
South Ural State University (NRU), Chelyabinsk

At present time, there is a need in the industry for so-called intelligent measuring instruments, i.e. in sensors with the function of metrological self-validation or diagnostics of it's own state (self-diagnostics). The way to diagnose the state of a pressure sensor is using supersonic sounding. There is a piezoelectric ring, that is located in the sensor body. This ring generates natural vibrations which are caused by ultrasonic impulse. The ring's best orientation relative to the sensor's sensitive elements was chosen according to the results of simulation of far field patterns of the ring. Analysis of the frequencies of the natural vibrations was made using Matrix Pencil Method. This method gives opportunity to get a natural frequency with quite good accuracy and high productivity. The results of the researching are verified by experimental data.

Keywords: intelligent sensors, fault detection, matrix pencil method

Введение

Опыт эксплуатации измерительных приборов показывает, что в процессе их работы они могут быть подвержены различного рода неисправностям. Эти неисправности в большинстве случаев незначительны, но при накоплении могут привести к ухудшению метрологических характеристик или метрологическому отказу средства измерений. Для снижения вероятности получения недостоверной измерительной информации в течение межповерочного интервала, следует внести в датчик новую функциональную возможность – автоматическую проверку метрологической исправности. Такая возможность позволит увеличить не только надежность средства измерения, но и межповерочный интервал, т.е. уменьшить расходы, затраченные на обслуживание, ремонт или замену измерительного прибора. Концептуальные основы такого подхода были разработаны Манусом Генри и Дэвидом Кларком [1], а также отечественными учеными Таймановым Р.Е. и Сапожниковой К.В. [2].

Проблемной областью в вопросах самоаттестации датчиков, являются датчики давления, так как датчики давления подвержены постоянным неблагоприятным фактам. В статье [3] главными причинами выхода из строя преобразователя давления указывается повреждение диафрагмы за счет гидравлических ударов или резких пульсаций давления. Также проанализированы некоторые факторы,

влияющие на погрешность преобразователя давления, это может быть изменение жесткости мембраны, изменение геометрических характеристик, изменение модуля упругости и др.

Из теории известно [4], что собственные частоты колебания объекта не зависят от внешних воздействий, а зависят только от физических параметров его конструкции, т.е. по изменению в собственных колебаниях можно судить об изменении модуля упругости, жесткости и др. физических величин конструкции датчика, так или иначе влияющих на погрешность измерений. Возможности использования данного подхода к диагностике состояния преобразователя давления посвящена статья [5]. Собственные колебания тензометрического датчика давления возбуждают внешним пьезокерамическим излучателем, по выходному сигналу с датчика оценивают частоты собственных колебаний.

Авторами патента [6] была предложена конструкция преобразователя давления со встроенным возбуждением. В преобразователе создана функциональная избыточность в виде пьезокерамического кольца, которое возбуждается ультразвуковым импульсным сигналом с различной длительностью. При прохождении импульса через конструкцию датчика возбуждаются собственные частоты и на выходе получают сигнал отклика. Сигнал отклика представляет собой сумму затухающих синусоид, частоты которых соответствуют собственным частотам колебания преобразователя давления.

Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля [6] содержит корпус 1, разделительную 4 и измерительную диафрагму 5, соединенные полостью 2, заполненной малосжимаемой жидкостью. В корпусе 1 напротив разделительной диафрагмы 4 в кольцевой паз 6 помещено пьезокерамическое кольцо 3. Кольцевой паз 6 является частью полости 2. Пьезокерамическое кольцо 3 выполнено с металлизированными верхними и нижними поверхностями, играющими роль электродов, при этом нижний электрод 7 соединен с корпусом датчика 1. На верхний электрод 8 подается напряжение по проводнику 9, размещенному в отверстии 10 корпуса 1, которое заполненное компаундом (рисунок 1).

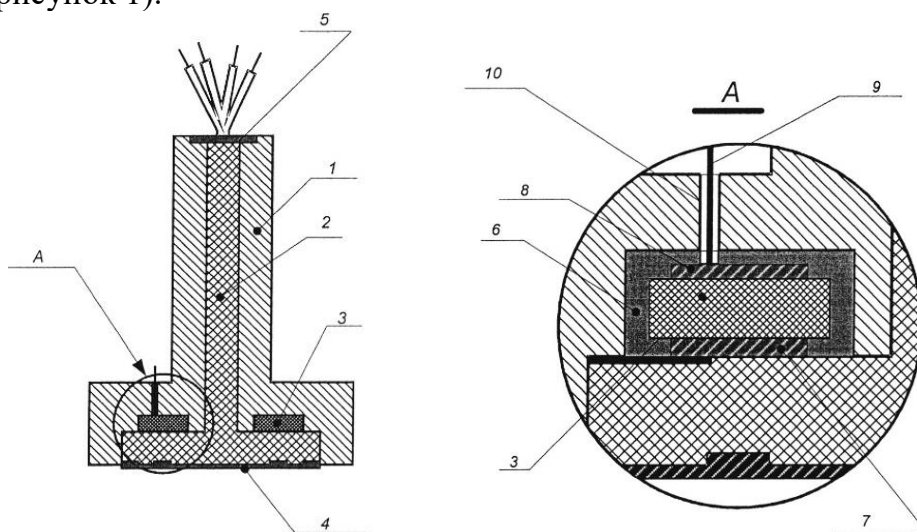


Рис. 1 – Конструкция датчика давления с кольцом внутри

Методы обработки сигнала

Изменение частот собственных колебаний конструкции датчика имеют малое значение, как правило, не превышающее 1 % [7], вследствие этого требуется



методы анализа сигнала, позволяющие получать частоты с точностью не меньше 0,5 %. Одним из самых эффективных методов исследования сигнала является Преобразование Фурье [8-9]. Преобразование Фурье хоть и является надежным средством обработки сигналов имеет ряд недостатков для целей диагностирования [10] к таким можно отнести ухудшение динамических характеристик алгоритмов обработки, трудность работы с нестационарными сигналами, а также ограничение на разрешение частот, связанное соотношением неопределенности $\Delta\omega \sim \frac{1}{\Delta T}$, где $\Delta\omega$ и ΔT необходимое разрешение по частоте и время наблюдения, необходимое для его обеспечения, соответственно.

Одним из способов преодоления соотношения неопределенности является переход к параметрическим методам обработки сигналов, в которых обычно предполагается, что сигнал состоит из суммы сигналов известной формы. Одним из методов данного класса является метод Прони, предложенный в 18 веке бароном де-Прони [11], сигнал в этом случае представляется в виде комбинации экспоненциальных экспонент. При оценке данным методом возникают две проблемы – это необходимость точного знания экспоненциальных экспонент, а также чувствительность к аддитивному шуму [12]. Надо заметить, что метод Прони применялся для построения модели сигнала с датчика давления [13]. Метод матричных пучков (ММП) [14] позволил преодолеть эти две проблемы, число экспоненциальных экспонент определяется в ходе работы метода, а по результатам исследования можно утверждать, что ММП более устойчив к аддитивному шуму, чем метод Прони [15].

Надо заметить, что метод неоднократно улучшался и модифицировался под различные задачи. Например, в [16] предложен метод фильтрации сигналов при помощи полюсов и обратных полюсов сигнала, в [17] улучшение ММП за счет сохранения ганкелевой структуры матрицы данных и т. д. Помимо улучшения точности работы метода, он был модифицирован под различные задачи, например в статье [18] был предложен ММП для квантовых компьютеров, модификация для векторных процессов, таких как сигнал с кориолисового расходомера, была предложена в статье [19-20], для предсказания процессов в доменной печи [21].

Численный эксперимент

Так как выходной сигнал с преобразователя давления представляет собой сумму затухающих колебаний, то для проверки работы метода интересно рассмотреть следующий вид сигнала:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N Am_n \cdot e^{-\alpha_n t} \cdot \sin(2\pi f_n t) + noise(t),$$

где, $noise(t)$ – аддитивный шум, а параметры сигнала сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры заданного сигнала

N	1	2	3	4	5	6
Am_n	5e-5	9e-5	3e-5	3e-5	1,5e-5	1,2e-4
α_n	1,8e3	2,4e3	1,5e3	3,1e3	2,4e3	2,9e3
f_n	25400	34400	43500	57700	74300	82300

В качестве аддитивного шума ($noise(t)$), будем использовать нормальную случайную величину с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратич-



ным отклонением $\sigma = 0,001$. Характеристика качества сигнала является отношение сигнал/шум которое в общем виде для данного сигнала может быть рассчитано по следующей формуле:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N x(n)^2}{N \cdot \hat{\sigma}} - 1 \right),$$

где $x(n)$ – дискретная значения реального сигнала, N – число отсчетов, $\hat{\sigma}$ – несмещенная оценка СКО шума.

Данный расчет упрощает определение отношения сигнал/шум, так как не нужно отдельно выделять шумовые и полезные компоненты сигнала, а необходимо знать лишь СКО шума, которую можно оценить до времени действия полезного сигнала. Можно сказать, что такой расчет может подойти, как для детерминированных сигналов, так и для сигналов неизвестной формы [22]. Для модельного сигнала отношение сигнал/шум составляет $SNR = 2,8$ дБ.

При оценке данного зашумленного сигнала и дискретизации его частотой близкой к оптимальной частоте дискретизации [23], рассчитываемой по формуле 1, можно получить, параметры практически без погрешности.

$$Fs = 4 \cdot K \frac{\sum_{k=1}^K f_k^2}{\sum_{k=1}^K (2k-1) \cdot f_k}, \quad (1)$$

где f_k – набор предполагаемых частот $f_1 < f_2 < \dots < f_K$ полученных например при помощи преобразования Фурье, K – количество частот в сигнале.

Так как параметры сигнала находиться с очень маленькой погрешность, но ее необходимо оценить, то воспользуемся обобщенным показателем близости – среднеквадратичным отклонением (RMSE), рассчитываемым по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{Y}(n) - Y(n))^2}.$$

При восстановлении сигнала при данном уровне шума, показатель RMSE оказался равным $RMSE = 5,1869e - 18$.

Т.к. в выходном сигнале требуется отслеживать параметры сигнала очень точно порядка 1 % (как говорилось ранее), то заявленная точность является хорошим знаком, для использования данного метода в диагностических целях.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной проверки работы метода были сняты выходные сигналы с датчика давления с частотой дискретизации $Fs = 500$ кГц в двух разных состояниях (в качестве датчика был рассмотрен датчик [6]). Первое состояние соответствует нормальному состоянию датчика, а второе соответствует изменённому состоянию. Импульс возбуждения имеет время импульса 100 мкс.

По 10 реализациям каждого сигнала при децимации в 200 раз было получено 200 массивов данных одной реализации. Для каждой реализации по 200 массивам данных было рассчитано среднее значение. Далее для 10 значений средней частоты было рассчитано СКО. Результаты оценки сведены в таблицу

Таблица 2

Параметры сигнала, оцененные в первый и второй день

	Нормальное состояние D	СКО D	Измененное значение Dch	СКО Dch	D-Dch
1	25276,32	0,46	25289,99	0,63	13,67
2	34117,96	0,45	34119,34	0,64	1,38



3	44736,95	1,53	44678,10	1,13	58,85
4	57813,51	1,57	57821,91	1,71	8,40
5	73891,81	0,61	74766,85	0,52	875,04
6	82088,13	0,23	82083,92	0,22	4,21

Как видно при изменении состояния датчика давления меняется и значение частот выходного сигнала. Изменение пятой гармоники составляет 1%, третьей 0,1%.

По результатам обработки экспериментальных данных можно сделать вывод, что действительно при изменении состояния датчика меняются частоты его собственных колебаний, т.е. частоты выходного сигнала. И метод позволяет видеть эти изменения.

Заключение

Для предложенной конструкции датчика давления с пьезокерамическим кольцом внутри предложен новый метод обработки сигналов методом матричных пучков, который показал себя хорошо как на модельном сигнале, так и на экспериментальных данных. Экспериментальный пример дал понять, что метод действительно может показать, изменение состояние датчика давления по оценкам частот выходного сигнала. Дальнейшие исследования будут направлены на выявления состояний, которые чаще встречаются на практике в тензометрических датчиках давления.

Список цитируемой литературы

1. M.P. Henry and D.W. Clarke, "The Self-validating Sensor: Rationale, Definitions and Examples", Control Engineering Practice, vol. 1, no. 4, pp. 585–610, 1993.
2. Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Метрологический самоконтроль датчиков // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения Материалы конференции с международным участием. Сборник трудов конференции, 2010. С. 1088-1099.
3. Бушуев О.Ю. Анализ возможных неисправностей, источников погрешности и выхода из строя тензопреобразователя давления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2013. №4. С. 118-122
4. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. М.: Наука, 1964.
5. О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов Экспериментальное исследование возможности диагностики состояния тензометрического преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2012. №35(294). Вып. 17. С. 65 – 68.
6. Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля (патент на полезную модель): пат. 145163 Рос. Федерация; / Семенов А.С., Сеницин В.В., Бушуев О.Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – №2014102137/28; заявл. 22.01.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25 – 2 с., 1 ил.
7. Моделирование влияния дефектов мембраны тензопреобразователя давления на его частотные характеристики / О.Ю. Бушуев, И.И. Григорьев, Е.С. Коровченко, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. Т. 13, № 2. С. 74-81.
8. Marple, S.L. Digital spectral analysis: with applications. New Jersey: Prentice-Hall, 1987.
9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Изд-во Питер, 2002. – 608 с.
10. Оценка эффективности различных методов анализа временных диагностических сигналов / Круглова Т.Н. и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8-2. – С. 237-241;
11. Prony, G. Essai experimental et analytique: sur les lois de la dilatabilite de uides elastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'aau et de la vapeur de l'alkool, a dierentes temperatures / G. Prony // Journal de l'Ecole polytechnique oreale et plairia. 1795. V. 1, P. 2476.
12. R. Kumaresan, D.W. Tufts, L.L. Scharf. A Prony Method for Noisy Data: Choosing the Signal Components and Selecting the Order in Exponential Signal Models // Proceedings of the IEEE. 1984. V. 72, № 2. P. 230-233.



13. Бушуев О.Ю. Применение метода Прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 23 (282). С. 219-221.
14. Y. Hua, T.K. Sarkar. Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1990. V. 38, № 5. P. 814-824.
15. F. Sarrazin, A. Sharaiha, P. Pouliguen. Comparison Between Matrix Pencil and Prony Methods Applied on Noisy Antenna Responses // Loughborough Antenna and Propagation Conference. 2011. P. 14.
16. О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов. 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.
17. B. Lu, D. Wei, B.L. Evans. Improved matrix pencil methods // Proc. IEEE Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers. 1998. V. 2, № 2. PP. 1433-1437.
18. A. Steffens, P. Rebentrost, I. Marvian. An efficient quantum algorithm for spectral estimation // New J. Phys. 2017. V. 19, № 1. PP. 1–14.
19. Метод матричных пучков для оценки параметров векторных процессов / М.П. Генри, О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2017. Т. 10, № 4. С. 92–105.
20. Салов Д.Д., Бушуев О.Ю. Применение метода матричных пучков для оценки параметров векторных процессов в задаче оценки разности фаз и частоты сигналов кориолисовых расходомеров // Наука ЮУрГУ. Материалы 70-й научной конференции. Южно-Уральский государственный университет. 2018. С. 547-554.
21. Barbasova, T.A., Lapteva, Y.V., Salov, D.D. Application of recurrent neural network and matrix pencil method in predicting blast furnace thermal state indicators // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018.
22. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Труды МАИ. Выпуск № 83, 2015.
23. O.Yu. Bushuev, O.L. Ibryaeva. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method // Proceedings of the 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic.