



Разработка конечно-элементной модели резонатора для вибрационного сигнализатора уровня камертонного типа

А. М. Бражников

аспирант;
СамГТУ, г. Самара;
artembragnicov@yandex.ru

С. Ю. Ганигин

доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Радиотехнические устройства»;
СамГТУ, г. Самара;
ganigin.s.yu@yandex.ru

В статье представлены результаты разработки конечно-элементной модели резонатора вибрационного сигнализатора уровня камертонного типа. Модель разработана в программном продукте Ansys Workbench. Предложены варианты оценки характеристик резонатора, включающие прочностной, модальный, гармонический анализы. Разработана модель свободных затухающих колебаний резонатора, включающую динамический прочностной расчёт в сочетании с модулем вычислительной гидродинамики. Модель позволяет производить оценку частоты колебаний резонатора в жидкостях с различными плотностями и вязкостями. Результаты моделирования сопоставлены с лабораторными экспериментами. Сравнение показало отклонение по резонансным частотам не более 7%. Результаты моделирования будут использованы для проведения структурной оптимизации геометрии резонатора для расширения диапазона плотностей и вязкостей рабочих жидкостей сигнализатора уровня.

Ключевые слова: камертонный сигнализатор уровня; компьютерное моделирование; резонансная частота; модальный анализ; динамический анализ

Цитирование: Бражников, А. М. Разработка конечно-элементной модели резонатора для вибрационного сигнализатора уровня камертонного типа / А. М. Бражников, С. Ю. Ганигин // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №4. – С. 54-62. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-54-62

Введение

В настоящее время измерение плотности жидкости в режиме реального времени имеет большое значение при автоматизации технологических процессов. Широкое распространение получили измерители плотности жидкости на основе механических резонаторов – плотномеры вибрационного типа [1].

В задачах автоматизации часто возникает задача определения наличия или отсутствия жидкости определённой плотности в резервуаре или трубопроводе. Для этих задач используются сигнализаторы уровня. Среди вибрационных сигнализаторов уровня выделяются датчики с резонатором в виде симметричного камертона (сигнализатор уровня камертонного типа). По сравнению с другими типами сигнализаторов, камертонный обладает рядом преимуществ [2]:

- высокая чувствительность к плотности жидкости;

- малый размер чувствительного элемента для использования в трубопроводах малого диаметра;
- отсутствие подвижных частей, что обеспечивает высокую надёжность;
- экономичность в параметрах энергопотребления, что позволяет разрабатывать устройства, осуществляющие измерения в режиме реального времени, при этом питающиеся от маломощных промышленных интерфейсов (NAMUR, 4-20мА и т.д.).

Принцип работы вибрационного сигнализатора уровня заключается в возбуждении вынужденных колебаний механического резонатора на частоте первой гармоники, которая зависит от характеристик среды, в которой совершает колебания резонатор. Электроника прибора фиксирует изменение резонансной частоты при погружении чувствительного элемента в среду. На резонансную частоту оказывает влияние плотность среды, а также другие факторы, среди которых вязкость. Чем выше плотность среды, тем ниже резонансная частота. Чем плотность ниже, тем резонансная частота выше. Чем выше вязкость, тем быстрее затухают колебания резонатора [3].

Геометрические параметры резонатора оказывают существенное влияние на метрологические характеристики прибора, а также на диапазон плотностей и вязкостей, в которых может работать прибор.

Проводились эксперименты по оптимизации конструкции резонатора вибрационного плотномера камертонного типа, в ходе которых было установлено, что резонансная частота камертонов с прямоугольным сечением лепестков меньше зависит от вязкости, чем у камертонов с круглым сечением при той же эффективной массе [4].

Эксперименты по оптимизации конструкции камертонов привели к созданию миниатюрных колебательных систем, которые могут выступать в роли датчиков плотности, вязкости и давления одновременно. Такой подход требует более глубокого анализа характеристик колебаний и не всегда подходит для недорогих устройств вроде вибрационных сигнализаторов уровня, которые должны изменять состояние своего выхода при погружении в любую жидкость [5].

Исследования датчиков плотности камертонного типа позволяют оптимизировать отдельные параметры резонаторов для работы с различными жидкими средами в интересующем диапазоне плотностей и вязкостей. Производители сигнализаторов уровня, как правило, имеют несколько модельных рядов приборов, отличающихся формой и размерами резонаторов для работы с разными средами.

При разработке новых приборов также необходимо учитывать технические возможности производства, на котором будет производиться прибор. Может возникнуть ситуация, когда оптимальная форма резонатора не может быть получена с использованием технологических процессов, доступных на предприятии.

В рамках научно-исследовательской работы авторами поставлена задача разработки компьютерной модели чувствительного элемента вибрационного сигнализатора уровня камертонного типа с использованием конечно-элементного моделирования в программном продукте Ansys Workbench. Полученные модели были использованы для оптимизации геометрии резонаторов камертонных сигнализаторов уровня, адаптации геометрии под технологические возможности целевого производства. Модели были верифицированы результатами лабораторных экспериментов, которые показали хорошую сходимость.

В настоящей статье раскрываются подходы, использованные при моделировании резонансных колебаний стальных камертонов с учётом характеристик плотности и вязкости рабочей среды. Также приводятся результаты моделирования в сопоставлении с результатами лабораторных экспериментов. Работы по оптимизации конструкции камертона на момент создания статьи продолжаются.

1 Математическая модель колебаний камертона

Чувствительным элементом вибрационного сигнализатора уровня является сборка, состоящая из резонатора – камертона, к мембране которого присоединяется пьезоэлектрический привод (рисунок 1). Внешний источник напряжения возбуждает колебания пьезопривода, которые передаются на мембрану камертона, а затем на лепестки. Пьезоэлектрический привод состоит из силовой части и чувствительной части, которые могут быть выполнены в виде монолитного пьезоэлемента или пакетной конструкции [6].

Зависимость между резонансной частотой и плотностью жидкости может быть описана формулой:

$$\rho = k_0 + k_1 f + k_2 f^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды (кг/м³); f – частота резонанса камертона (Гц), k – коэффициенты, зависящие от геометрии камертона и свойств жидкости.

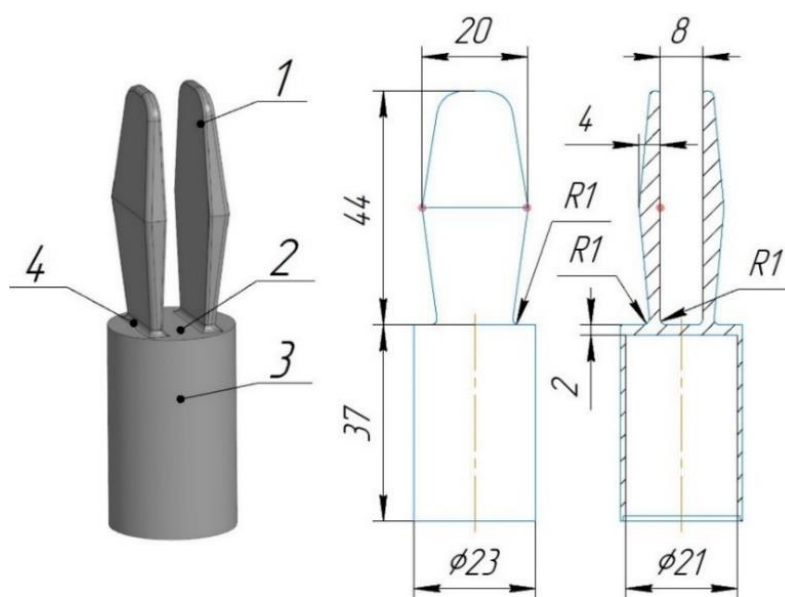


Рисунок 1 – Внешний вид и основные геометрические параметры резонатора вибрационного сигнализатора уровня Emerson:

1 – лепесток камертона; 2 – мембрана камертона;
3 – корпус (трубка); 4 – радиусы скругления при лепестках

Движение лепестков камертона передаётся от мембраны, которая деформируется под воздействием пьезоэлектрического привода. Во время работы корпус прибора фиксируется неподвижно относительно трубопровода или ёмкости, таким образом камертон пребывает в покое относительно потока жидкости, находящегося вокруг него. Поведение каждого лепестка может быть описано исходя из теории балок Эйлера-Бернулли [7]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right) + \rho_b b c \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга балки; J – коэффициент сечения; ρ_b – плотность материала балки; b – ширина балки; c – толщина балки; $y(x, t)$ – основная модовая функция балочной конструкции.

В данной статье подробно не описывается процесс решения, приводятся только промежуточные и конечные результаты, необходимые для понимания механики колебаний камертонов.

Зависимость между собственной частотой колебаний P для i гармоника имеет вид:

$$P_i = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho_b b c l^4}}, \quad (3)$$

где λ_i^2 – функция порядка мод колебаний в балке (для идеальной консольной балки $\lambda_1 = 1,875$; $\lambda_2 = 4,694$; $\lambda_3 = 7,855$), l – длина балки.

Частота свободных колебаний лепестка камертона аналогична идеальной консольной балке. Подставляя в (3) коэффициенты λ можно получить частоту свободных колебаний камертона в воздухе (вакууме).

При погружении камертона в жидкость, она оказывает сопротивление движению лепестков камертона, это эквивалентно тому, что к лепесткам присоединяется распределённая масса. Сила, действующая на лепестки резонатора, может быть описана уравнением [8]:

$$F = m_g \frac{dv}{dt} + \gamma v + k \int v dt, \quad (4)$$

где F – сила, действующая на исследуемую жидкость; γ – постоянная вязкости; v – относительная скорость потока; m_g – эффективная масса консольной балки; k – жёсткость камертона.

Если камертон совершает колебания в жидкости, то частота собственных колебаний с учётом присоединённой массы жидкости описывается уравнением:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_g + \Delta m}}, \quad (5)$$

где k – жёсткость резонатора; Δm – общая эффективная масса жидкости, вовлекаемая в процесс колебаний.

Увеличение размеров камертона приводит к снижению частоты собственных колебаний.

В разделе с конечно-элементным моделированием будет показано, что на чувствительность сборки «резонатор – пьезоэлемент» оказывают влияние не только размеры камертона, но и такие параметры как толщина мембраны. В разделе с лабораторными экспериментами будет показано, что на резонансные характеристики существенно влияет длина трубки резонатора.

2 Конечно-элементное моделирование колебаний резонатора

Трёхмерная модель резонатора построена в программном продукте КОМПАС-3Д. Габаритные размеры показаны на рисунке 1. За основу взята форма резонатора камертона серийно выпускаемого прибора компании Emerson.

Конечно-элементное моделирование проводилось в программном продукте Ansys Workbench. Использовались следующие типы расчётов: модальный анализ (modal analysis), статический прочностной анализ (static structural), комплексный анализ (transient structural + fluent).

В качестве материала выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т с известными коэффициентами материала.

3 Статический прочностной анализ (static structural)

Вибрационные сигнализаторы уровня могут работать при высоком рабочем давлении среды. Однако это предъявляет требования к толщине стенок корпуса чувствительного элемента, в частности к толщине мембраны (рисунок 1). Через мембрану колебания пьезоэлектрического привода передаются на лепестки камертона. Исследования показывают, что для наилучшей передачи колебаний мембрана должна быть как можно тоньше. В то же время, она должна сопротивляться высокому давлению. Для некоторых приборов величина рабочего давления среды может достигать 10 МПа.

С помощью статического прочностного анализа была проведена оценка напряжений в материале корпуса резонатора при внешнем давлении 10 МПа. Стенка стакана камертона имеет толщину 1,5 мм. Мембрана камертона имеет толщину 1,5 мм и внутренний диаметр 18 мм. Давление прикладывалось на всю внешнюю поверхность резонатора. Фиксация модели проводилась по торцу корпуса (трубки) (рисунок 2). Размер расчётной сетки 10^{-3} м. Количество элементов около 65000.

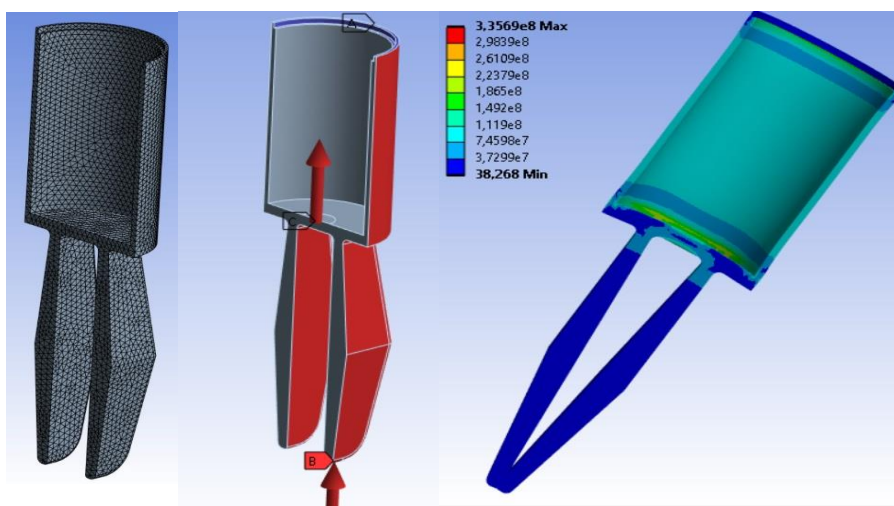


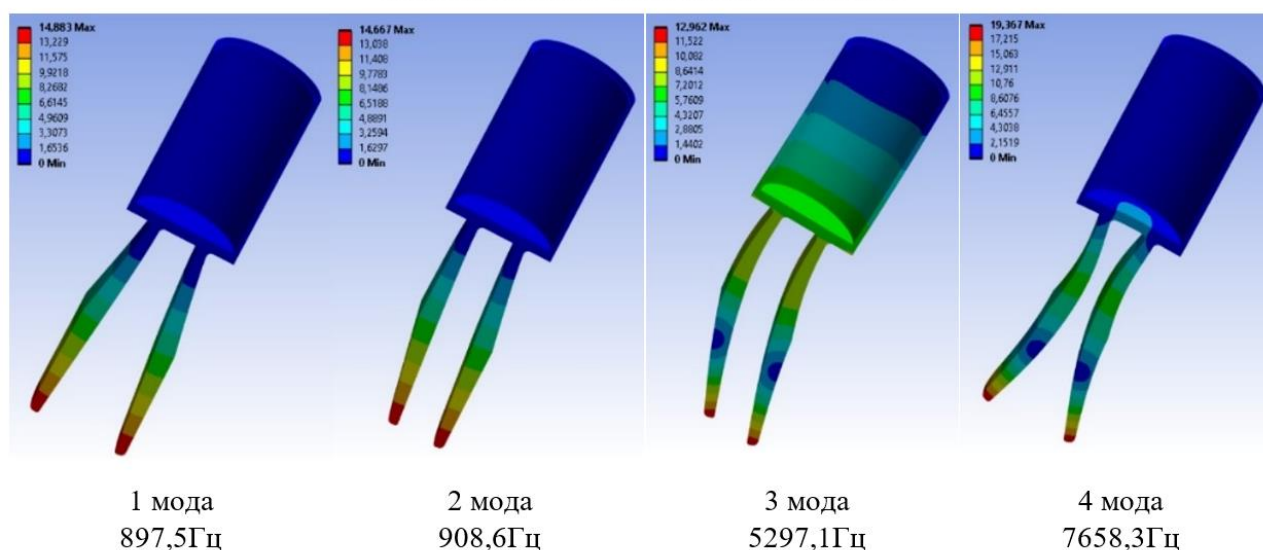
Рисунок 2 – Граничные условия для прочностного расчёта:
А – закрепление модели; В – гидростатическое давление; С – давление 10 МПа

Результаты оценки эквивалентных напряжений в материале показаны на рисунке 2. Наибольшее напряжение около 335 МПа зафиксировано на мембране. Для стали 12Х18Н10Т нижний предел прочности составляет 550 МПа. Максимальное перемещение кончика лепестка составляет около 85 мкм. Прогиб геометрического центра мембраны внутрь корпуса в осевом направлении составляет 24 мкм.

4 Модальный анализ

Проанализированы первые 4 моды колебаний резонатора (рисунок 3). Колебания резонатора возбуждаются именно на первой гармонике, так как она имеет наибольший отклик. Как говорилось выше, чем ниже частота колебаний резонатора, тем меньшее влияние оказывает параметр вязкости жидкости на работу прибора. Если оценивать форму колебаний мембраны на разных гармониках, становится очевидным, что возбудить колебания на 1 и 4 гармониках возможно с использованием простых пьезоэлектрических приводов на основе монолитных пьезоэлементов или пакетных активаторов. Однако возбуждение колебаний 2 и 3 моды сложнее и требует распределённого пьезопривода.

Моды колебаний лепестков резонаторов



Моды колебаний мембран резонаторов



Рисунок 3 – Модальный анализ колебаний резонаторов

5 Гармонический анализ

В ходе гармонического анализа на геометрический центр внутренней поверхности мембраны камертона воздействовала сила 10 Н. Моделирование проводилось для частот от 200 до 2000 Гц с шагом 10 Гц. Измерялась деформация геометрического центра мембраны в осевом направлении (рисунок 4).

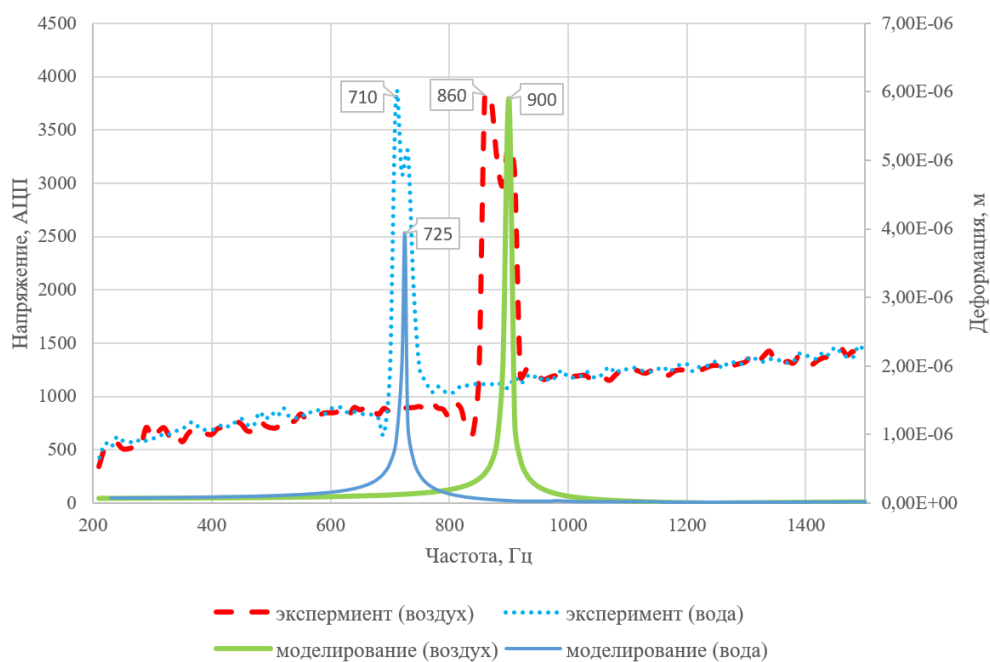


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристика модели и реального камертона

Резонансный пик на графике деформации мембраны совпадает по частоте с резонансным пиком на графике деформации кончика лепестка (на рисунке не показан). Проводилось измерение резонансной частоты реального резонатора. Получен пик резонансной частоты на частоте 860 Гц, что хорошо согласуется с результатами моделирования (900 Гц). Резонансный пик реального камертона шире, предположительно из-за наличия демпфирования материала, которое не учитывается в модели.

6 Комплексный анализ

Комплексный анализ предназначен для оценки влияния параметров среды на частоту собственных колебаний резонатора. Метод основан на использовании динамического прочностного (transient structural) анализа в сочетании с модулем гидродинамики (fluent). Результаты прочностного расчёта передаются в модуль для расчёта поведения жидкости при помощи инструмента для решения связанных задач (system coupling).

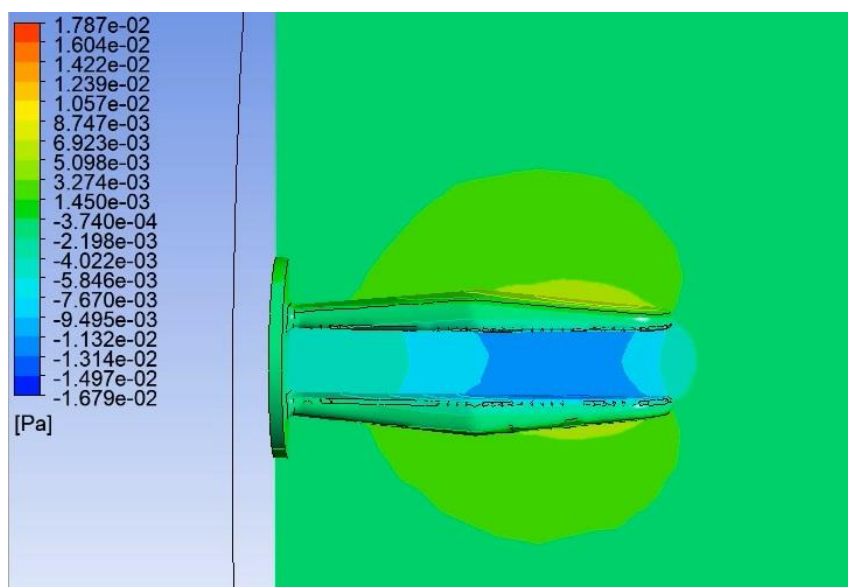


Рисунок 5 – Контурные давления при моделировании затухающих колебаний камертона в жидкости с плотностью 1000кг/м³

В динамическом прочностном анализе на геометрический центр мембраны оказывалось ступенчатое воздействие силой 10 Н. После чего начинались свободные незатухающие колебания лепестков резонатора на первой гармонике. При добавлении модуля fluent колебания становились затухающими и полностью прекращались через 15-20 периодов. Сходная картина наблюдается в ходе лабораторных экспериментов с камертонами. Результаты моделирования показали частоту затухающих колебаний 725 Гц. В ходе экспериментов с водой ($\approx 1000 \text{ кг/м}^3$) получена частота 710 Гц (рисунок 5). Результаты моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Полученная модель будет использоваться для оптимизации геометрии камертонов.

Заключение

Авторами разработана конечно-элементная модель резонатора вибрационного сигнализатора уровня камертонного типа, которая позволит производить структурную оптимизацию геометрии камертона для работы с различными жидкими средами. Полученная модель демонстрирует хорошую сходимость с результатами лабораторных экспериментов, проводи-

мых на воздухе и в воде. Результаты моделирования также показали сходимость с материалами, описанными в анализе источников литературы.

Оценка величины деформации различных элементов камертона, приводимая в настоящей статье, не получила экспериментального подтверждения. Эти результаты являются предметом обсуждения и дальнейших исследований.

Дальнейшее совершенствование модели может быть достигнуто за счёт использования модели колебаний пьезоэлектрических преобразователей. Конструкция пьезоэлектрического привода может оказывать незначительное влияние частоты колебаний резонаторов. Это обстоятельство принято за допущение в рамках данной работы. Возможно, именно дополнительной массой пьезоэлектрического привода, присоединённого к мембране камертона, объясняется, что при моделировании получены резонансные частоты выше, чем в лабораторных экспериментах.

Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных также обуславливается неточностью, созданной 3D модели резонатора.

Список использованных источников

1. Roshani, G. H. Online measuring density of oil products in annular regime of gas liquid two phase flows / S. Roshani, E. Nazemi, S. Roshani // Measurement. – 2018. – vol. 129. – pp. 296–301.
2. Зацерклянный, О. В. Исследование и разработка прецизионного плотномера жидкостей и газов на основе камертонного вибропреобразователя : диссертация ... кандидата технических наук / Зацерклянный Олег Владимирович. – Новочеркасск, 2021 г.
3. Богущ, М. В. Вибрационные сигнализаторы уровня для магистральных газопроводов / М. В. Богущ, А. А. Гарковец, Э. М. Пикалев, А. Е. Панич // НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, ООО «Пьезоэлектрик» Ростов-на-Дону.
4. Gonzalez, M. Downhole viscosity measurement platform using tuning fork oscillators / M. González, G. Ham, A. A. Haddad, G. Bernero, M. Deffenbaugh // 2015 IEEE SENSORS. – November 2015.
5. Jakoby, B. Miniaturized sensors for the viscosity and density of liquids-performance and issues / B. Jakoby, R. Beigelbeck, F. Keplinger et al. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2010. – vol. 57, no. 1. – pp. 111–120.
6. Guan, Y. Performance analysis of a microfluidic pump based on combined actuation of the piezoelectric effect and liquid crystal backflow effect // Micromachines. – 2019. – vol. 10, no. 9.
7. Haozhi, Q. Quasistatic nonlinear analysis of a drill pipe in subsea xmas tree installation / J. Liu, W. Xiao, B. Wang // Mathematical Problems in Engineering. – 2019. – vol. 2019. – Article ID 4241363. – 9 pages.
8. Hai, Y. Research on Tuning Fork Dimension Optimization and Density Calculation Model Based on Viscosity Compensation for Tuning Fork Density Sensor / Yang Hai, Rao Yue, Li Li, Liang Haibo, Luo Tao, Xin Gaifang // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – Article ID 7960546. – 17 pages.

Development of a finite element resonator model for a tuning fork-type vibration level detector

A. M. Brazhnikov

Postgraduate Student;
SamSTU, Samara, Russian Federation;
artembragnicov@yandex.ru

S. Y. Ganigin

Doctor of Science (Engineering), Head of the Department
of Radio Engineering Devices;
SamSTU, Samara, Russian Federation;
ganigin.s.yu@yandex.ru

The article presents the results of the development of a finite element resonator model of a tuning fork-type vibration level detector. The model is developed in the Ansys Workbench software product. Options for evaluating the characteristics of the resonator are proposed, including strength, modal, and harmonic analyses. A model of free damped resonator oscillations has been developed, including dynamic strength calculation in combination with a computational fluid dynamics module. The model makes it possible to estimate the frequency of resonator vibrations in liquids with different densities and viscosities. The simulation results are compared with laboratory experiments. The comparison showed a deviation in resonant frequencies of no more than 7%. The simulation results will be used to carry out structural optimization of the resonator geometry to expand the range of densities and viscosities of the working fluids of the level indicator.

Keywords: tuning fork level indicator; computer modeling; resonant frequency; modal analysis; dynamic analysis

Citation: Brazhnikov, A. M. and Ganigin, S. Y. (2024), "Development of a finite element resonator model for a tuning fork-type vibration level detector", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 4, pp. 54-62. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-54-62. (In Russian; abstract in English).

References

1. Roshani, G. H., Roshani, S., Nazemi, E. and Roshani, S. (2018), "Online measuring density of oil products in annular regime of gas liquid two phase flows", *Measurement*, vol. 129, pp. 296–301.
2. Zatserklyany, O. V. (2021), "Research and development of a precision density meter of liquids and gases based on a tuning fork vibration transducer", Ph.D. Thesis, Novocherkassk, Russian Federation. (In Russian)
3. Bogush, M. V., Garkovets, A. A., Pikalev, E. M. and Panich, A. E., "Vibration level detectors for main gas pipelines", NKTБ "Piezopribor" SFU, LLC "Piezoelectric" Rostov-on-Don. (In Russian)
4. González, M., Ham, G., Haddad, A. A., Bernero, G. and Deffenbaugh, M. (2015), "Downhole viscosity measurement platform using tuning fork oscillators", *2015 IEEE SENSORS*.
5. Jakoby, B., Beigelbeck, R., Keplinger, F. et al. (2010), "Miniaturized sensors for the viscosity and density of liquids-performance 16 Mathematical Problems in Engineering and issues", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 57, no. 1, pp. 111–120.
6. Guan, Y. (2019), "Performance analysis of a microfluidic pump based on combined actuation of the piezoelectric effect and liquid crystal backflow effect", *Micromachines*, vol. 10, no. 9.
7. Haozhi, Q., Liu, J., Xiao, W. and Wang, B. (2019), "Quasistatic nonlinear analysis of a drill pipe in subsea xmas tree installation", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 4241363, 9 pages.
8. Hai Yang, Yue Rao, Li Li, Haibo Liang, Tao Luo and Gaifang Xin (2020), "Research on Tuning Fork Dimension Optimization and Density Calculation Model Based on Viscosity Compensation for Tuning Fork Density Sensor", *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, Article ID 7960546, 17 pages.