

УДК 53.083

А.М. Низаметдинов

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ВИБРОВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В РЕЖИМЕ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Низаметдинов Азат Маратович, аспирант Ульяновского государственного технического университета, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Имеет статьи, изобретения в области информационно измерительных систем и автоматизации измерений. [e-mail: anizametdinov@yandex.ru].*

### Аннотация

В статье проведен анализ работы колебательной системы вибровискозиметрического датчика в предложенном режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала. Показан способ вычисления текущего значения добротности и собственной частоты по результатам измерения амплитуды вынужденных колебаний и разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом колебательной системы. Проведен анализ быстродействия системы в режиме с дискретной подстройкой частоты. Дана оценка погрешности вычисления параметров колебательной системы при частоте генератора, не равной собственной частоте колебательной системы. По результатам анализа даны рекомендации по рациональному выбору шага перестройки выходной частоты сигнала генератора.

Ключевые слова: колебательная система, вынужденные колебания, добротность, собственная частота, вибровискозиметрический датчик, разность фаз.

## THE ANALYSIS OF VIBROVISCOSITY SENSOR FUNCTIONALITY IN THE MODE OF TUNING THE FREQUENCY OF THE FORCED OSCILLATIONS

*Azat Maratovich Nizametdinov, Postgraduate Student at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Signor Staff Scientist at Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of the Russian Academy of Sciences; an author of articles, inventions in the field of information and measuring systems and measurement automation. e-mail: anizametdinov@yandex.ru.*

### Abstract

The analysis of the vibroviscosity sensor work in the proposed mode of forced oscillations with maintaining the specified value of the phase difference between the excitation signal and the response signal by tuning the frequency of the excitation signal is carried out. The method for calculating the current value of the Q-factor and the natural frequency with the use of the results of measuring the amplitude of forced oscillations and the phase difference between the excitation and output signals of the oscillatory system is considered. The author made the analysis of the system performance in the mode with discrete frequency tuning and error estimation of the oscillatory system parameters with the generator frequency that is not equal to the natural frequency of the oscillatory system. Some recommendations concerning the rational choice of the step changes of the output generator signal frequency are provided.

Key words: oscillating system, forced oscillations, q-factor, natural frequency, vibroviscosity sensor, phase difference.

### ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические вибровискозиметрические датчики находят широкое применение в современной технике и предназначены для измерения вязкости и плотности жидкостей или газов [1–11]. Чувствительным элементом вибровискозиметрических датчиков, как правило, являются колебательные системы с одной степенью свободы

[1–15]. В этом случае параметрами, несущими информацию об исследуемой среде, являются добротность  $Q$  и собственная частота  $\omega_0$  колебательной системы [1–15].

Подобный электромеханический вибровискозиметрический датчик используется в составе аппаратно-программного комплекса для анализа низкотемпературных свойств жидкостей, разработанного в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова Российской академии наук [16]. Особенностью данного вибровязкозиметрического датчика является то, что он должен обеспечивать измерение параметров вязкости и плотности жидкости, изменяющихся в процессе охлаждения и нагрева пробы. Основой вибровязкозиметрического датчика [9, 16] является колебательная система, в состав которой входит камертон 1 и стеклянный штوك 4 со сферическим зондом 5 на конце, прикрепленный к нижнему плечу камертона (рис. 1). Для измерения отклонения плеч камертона от положения равновесия используется датчик положения 2 на основе оптрона с открытым оптическим каналом. Электромагнитный возбуждатель 3 создает внешнюю периодическую силу, действующую на рабочее нижнее плечо камертона, при этом зонд камертона во время испытаний находится в исследуемой жидкости.

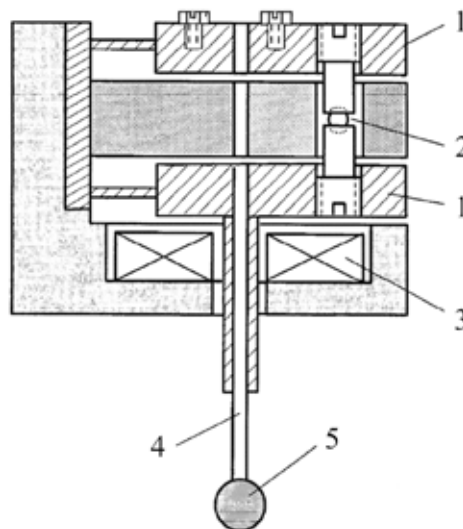


Рис. 1. Конструкция вибровязкозиметрического датчика

Для исследования низкотемпературных свойств жидкости исследуемую пробу охлаждают и нагревают по заданному (например, линейному) закону. При изменении температуры пробы меняются ее вязкость и плотность, в результате чего изменяется взаимодействие зонда с жидкостью и, как следствие, меняются добротность  $Q$  и собственная частота  $\omega_0$  колебательной системы датчика [2, 3, 5, 9, 12–16]. Функция вибровязкозиметрического датчика состоит в постоянной регистрации указанных изменений для последующего вычисления по полученным данным вязкости и плотности исследуемой жидкости. Для измерения добротности и собственной частоты колебательной системы возможны различные режимы работы вибровязкозиметрического датчика, такие как: сканирование по частоте [2, 4, 11, 15, 17–19,], автоколебательный режим [13, 15, 18, 20] и режим вынужденных колебаний [12–16]. В ходе изучения режимов работы вибровязкозиметрического датчика был предложен режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала.

усиления выходного сигнала вибровязкозиметрического датчика  $\varphi_T(\omega)$ .

Применение режима вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты возбуждающего сигнала позволило улучшить метрологические характеристики измерительной системы, использующей вибровязкозиметрический датчик. В отличие от автоколебательного, а также от обычного режима вынужденных колебаний, предложенный режим позволяет исследовать динамику изменения параметров колебательной системы в реальном времени для систем с малой добротностью.

Принцип предлагаемого режима работы вибровязкозиметрического датчика – режима вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты, поясняет функциональная схема, представленная на рисунке 2.

**Постановка задачи**

В режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала в качестве источника возбуждающего сигнала используется цифровой управляемый генератор [16]. Примем, что выходной сигнал генератора имеет вид  $U_c(t) = U \sin(\omega t)$ , где  $U$  – амплитуда сигнала,  $\omega$  – текущее значение частоты выходного сигнала генератора, изменяющееся с минимальным шагом  $\Delta\omega$ .

В качестве критерия настройки генератора на собственную частоту  $\omega_0$  колебательной системы используется значение разности фаз  $\varphi_0 = \pi/2$  между сигналом возбуждения и выходным сигналом колебательной системы вибровязкозиметрического датчика [21] (далее разность фаз). Подстройка частоты осуществляется модулем управления генератором на базе микроконтроллера. При этом значение разности фаз с выхода измерителя фазы сравнивается с опорным значением  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_T(\omega)$ , учитывающим фазочастотную характеристику электронного тракта



Рис. 2. Функциональная схема, поясняющая работу аппаратно-программного комплекса в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фазы путем подстройки частоты

Колебательная система вибровискозиметрического датчика является резонансной колебательной системой с одной степенью свободы. При воздействии на данную систему гармонической силой  $U_{вх}(t) = U_c(t) = F \sin(\omega t)$  (где  $F$  – статическая приложенная сила, то есть сила электромагнитного возбудителя, действующая на камертон при  $\omega = 0$  рад/с) выходной сигнал датчика положения будет иметь вид:  $U_{вых}(t) = y_a \sin(\omega t - \varphi)$ . При этом  $y_a$  – нормированная амплитуда вынужденных колебаний определяется из выражения [13]:

$$y_a = \frac{y_{cm}}{\sqrt{(1 - \xi^2)^2 + \frac{\xi^2}{Q^2}}}, \quad (1)$$

где  $\xi = \omega/\omega_0$ ,  
 $Q$  – добротность колебательной системы,  
 $y_{cm}$  – статическое смещение, определяемое как [13]:  
 $y_{cm} = F/k$ , (2)

где  $k$  – коэффициент жесткости колебательной системы.  
 Разность фаз между сигналом возбуждения и вынужденными колебаниями будет равна [13]:

$$\varphi(\xi) = \arctg \frac{\xi}{Q(1 - \xi^2)}. \quad (3)$$

Для измерения амплитуды колебаний  $y_a$  вибровискозиметрического датчика (рис. 2) и разности фаз  $\varphi$  могут применяться различные устройства и методы. Любой метод измерения характеризуется периодичностью  $\tau$  получения информации об измеряемом параметре. [18, 20–23].

В режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала информативными параметрами являются амплитуда колебаний вибровискозиметрического датчика, текущее значение частоты сигнала возбуждения, а также разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика датчика.

Незначительные отклонения разности фаз от значения  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_m(\omega)$  неизбежны в силу ограниченного быстродействия системы подстройки частоты при изменении параметров колебательной системы. Они возникают вследствие изменений вязкости и плотности исследуемой жидкости при ее охлаждении или нагреве в процессе испытаний и наличии шумов в измерительных трактах.

Задачами, решаемыми автором данной статьи, являлись анализ быстродействия системы с дискретной подстройкой частоты и анализ погрешности вычисления параметров колебательной системы при отклонении разности фаз от значения  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_m(\omega)$ .

### Анализ

В момент  $t = 0$  считаем, что выходная частота генератора равна собственной частоте колебательной системы, т. е.  $\xi = 1$ ,  $\varphi_0 = \pi/2$ . За время  $\tau$  амплитуда выходного сигнала и разность фаз могут поменяться из-за изменения

добротности и (или) собственной частоты колебательной системы. В данном случае будем считать погрешностью измерения амплитуды  $\vartheta_y$  и разности фаз  $\vartheta_\varphi$  разность между истинным значением в момент времени  $\tau$  и измеренным значением за время  $\tau$ . При этом погрешности измерения амплитуды  $\vartheta_y$  и разности фаз  $\vartheta_\varphi$ , как правило, не должны превышать значения шумов в измеряемых трактах  $\Psi_y$  и  $\Psi_\varphi$ , соответственно [23, 24]:

$$\vartheta_y \leq \Psi_y, \quad (4)$$

$$\vartheta_\varphi \leq \Psi_\varphi. \quad (5)$$

Считая, что  $\omega_0 = const$  и  $\xi = 1$  при выполнении условия (4) из выражения (1) получаем, что изменение добротности  $\Delta Q$  колебательной системы за время измерения  $\tau$  не должно превышать отношения значения шумов  $\Psi_y$  в измеряемом тракте к статическому смещению  $y_{cm}$ :

$$\Delta Q \leq \frac{\Psi_y}{y_{cm}}, \quad (6)$$

при  $\omega_0 = const$  и  $\xi = 1$ .

В соответствии с (1) и (3) при изменении собственной частоты колебательной системы  $\omega_0$  за время  $\tau$  изменится как амплитуда, так и разность фаз  $\varphi$ . При этом максимально возможное  $\vartheta_y$  и  $\vartheta_\varphi$  можно определить следующим образом:

$$\vartheta_y = y_a(Q(0), \omega_0(0)) - y_a(Q(\tau), \omega_0(\tau)), \quad (7)$$

$$\vartheta_\varphi = \varphi(Q(0), \omega_0(0)) - \varphi(Q(\tau), \omega_0(\tau)). \quad (8)$$

Очевидно, что максимальное изменение добротности не должно нарушать условие (6). Максимальное изменение собственной частоты колебательной системы не должно нарушать условия (4), (5), учитывая (7) и (8). Из данного вывода следует, что модуль управления генератором (рис. 2) должен принимать решение об изменении выходной частоты генератора, если отклонение разности фаз  $\varphi$  больше значения шумов  $\Psi_\varphi$  в тракте измерения разности фаз, т. е.:

$$\varphi_i - \varphi_{i+N} > \Psi_\varphi, \quad (9)$$

где  $i$  – номер отсчета измерения фазы, после которого было принято решение об изменении частоты выходного сигнала генератора,

$N$  – количество измерений для принятия решения об изменении частоты.

Из (9) при выполнении (5) получается, что для принятия решения об изменении частоты генератора необходимо провести, как минимум, два измерения.

Самый простой способ подстройки частоты, не требующий больших вычислительных мощностей, заключается в изменении выходной частоты генератора на минимальный шаг  $\Delta\omega$  его перестройки в ту или иную сторону в соответствии с (3). При этом шаг генератора  $\Delta\omega$  должен выбираться таким образом, чтобы изменение частоты генератора приводило к изменению разности фаз  $\Delta\varphi$  на величину, приблизительно равную по величине фазовым шумам  $\Psi_\varphi$  в измеряемом тракте:

$$\Delta\varphi(\Delta\omega) \approx \Psi_\varphi. \quad (10)$$

Таким образом, при максимальной скорости изменения собственной частоты колебательной системы, при

соблюдении условия (8), генератор будет перестраиваться после каждого измерения, так как будет выполняться условие (9), а величина ошибки настройки на собственную частоту колебательной системы будет  $\approx \Delta\omega$ .

После перестройки частоты генератора в колебательной системе возникают переходные процессы. Это вызвано тем, что в колебательной системе происходит процесс затухания колебаний на частоте  $\omega_1$  и нарастания колебаний с новой частотой  $\omega_2$ . Начиная с момента перестройки частоты генератора, выходной сигнал колебательной системы можно представить в следующем виде:

$$U_{\text{вых}}(t) = y_{a1}e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + y_{a2}(1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega_2 t - \varphi_2), \quad (11)$$

где  $y_{a1}$  – амплитуда вынужденных колебаний на частоте  $\omega_1$ ,

$\delta$  – коэффициент затухания в колебательной системе,

$\varphi_1$  – разность фаз на частоте  $\omega_1$ ,

$y_{a2}$  – амплитуда вынужденных колебаний на частоте  $\omega_2$ ,

$\varphi_2$  – разность фаз на частоте  $\omega_2$ .

Таким образом, измеренные амплитуда и частота выходного сигнала колебательной системы будут отличны от  $y_{a2}$  и  $\varphi_2$ .

Для определения ошибки измерения разности фаз воспользуемся выражением для разности выходного сигнала колебательной системы и сигнала, соответствующего установившемуся режиму колебаний на частоте  $\omega_2$ :

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) - y_{a2} \sin(\omega_2 t - \varphi_2) &= \\ &= y_{a1}e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + \\ &+ y_{a2}(1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega_2 t - \varphi_2) - \\ &- y_{a2} \sin(\omega_2 t - \varphi_2) = \\ &= e^{-\delta t} (y_{a1} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) - y_{a2} \sin(\omega_2 t - \varphi_2)). \end{aligned} \quad (12)$$

При малых значениях  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$  можно считать, что  $y_{a1} \approx y_{a2}$ . При этом получаем:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) - y_a \sin(\omega_2 t - \varphi_2) &= \\ &= 2y_a e^{-\delta t} \sin\left(\frac{\Delta\omega t - \varphi}{2}\right) \times \\ &\times \cos\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t - \varphi_1 - \varphi_2}{2}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ . Данное выражение отражает, насколько выходной сигнал колебательной системы отличается от ожидаемого сигнала с частотой  $\omega_2$  в каждый момент времени с момента перестройки генератора (далее разностное значение). Сомножитель  $2e^{-\delta t} \sin\left(\frac{\Delta\omega t - \Delta\varphi}{2}\right)$

является огибающей разностного значения, т. е. соответствует максимально возможному отклонению разностного значения в каждый момент времени. В этом случае ошибку измерения разности фаз можно записать следующим образом:

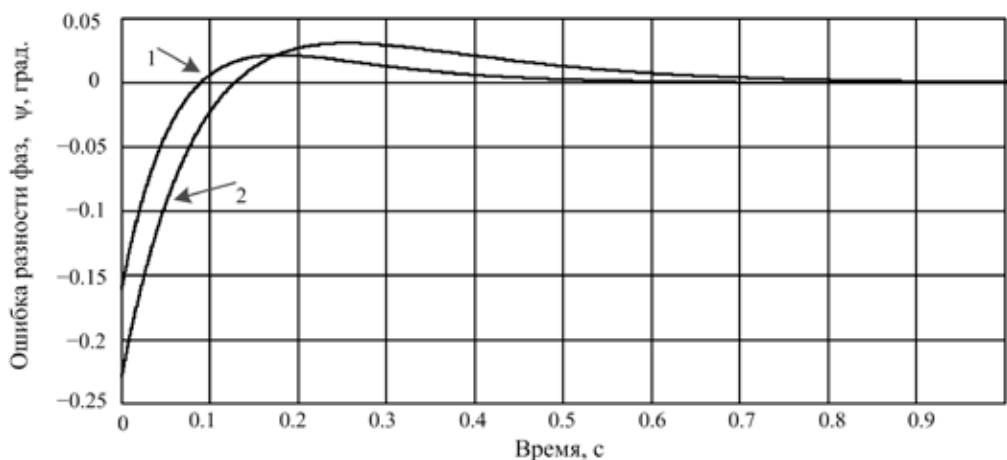
$$\psi(t) = \arcsin\left(2e^{-\delta t} \sin\left(\frac{\Delta\omega t - \Delta\varphi}{2}\right)\right). \quad (14)$$

Зависимость ошибки измерения разности фаз от времени после перестройки частоты в соответствии с (14) представлена на рисунке 3. Видно, что при малых значениях перестройки частоты максимальное значение ошибки измерения разности фаз будет наблюдаться сразу после изменения частоты генератора. Из (14) получаем:

$$\psi_{\text{max}} = \arcsin(2 \sin(-\Delta\varphi/2)). \quad (15)$$

При малых значениях  $\Delta\omega$  можно считать, что:  $\psi_{\text{max}} \approx -\Delta\varphi$ .

Для подтверждения описанных переходных процессов на рисунке 4 представлена осциллограмма, соответствующая моменту перестройки генератора с искусственно уве-



1 –  $Q = 70$ ; 2 –  $Q = 100$

Рис. 3. Зависимость ошибки измерения разности фаз от времени после перестройки частоты для двух значений добротности колебательной системы при  $f_0 = \omega_0/2\pi = 250 \text{ Гц}$  для  $\Delta f = \Delta\omega/2\pi = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$

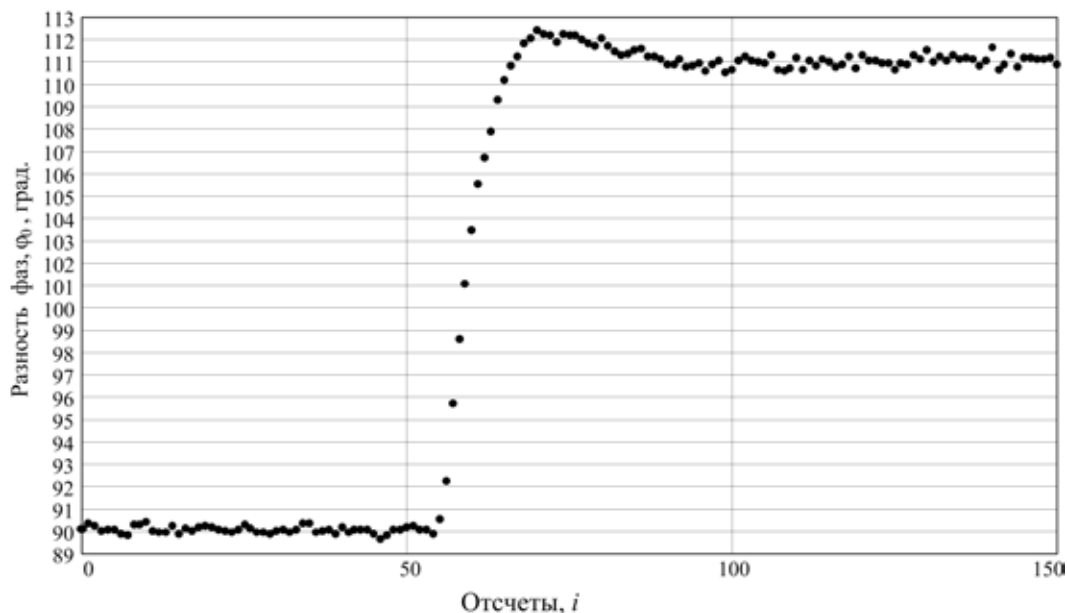


Рис. 4. Процесс перестройки значения частоты выходного сигнала генератора со значения собственной частоты колебательной системы  $f_0 = \omega_0/2\pi = 255,61 \text{ Гц}$  на один шаг  $\Delta f = \Delta\omega/2\pi = -2,75 \text{ Гц}$

личным шагом (в эксперименте умышленно нарушены ранее введенные условия (4) и (5)). Из рисунка 4 видно, что изменение разности фаз  $\Delta\varphi$ , вызванное изменением частоты выходного сигнала генератора, намного больше, чем погрешность измерения в виде выброса, вызванная переходными процессами. Таким образом, при малом значении шага перестройки частоты выходного сигнала генератора  $\Delta\omega$  (соблюдая условие (7), (8)) можно считать, что переходной процесс практически не вносит существенных ошибок в процесс измерения.

Полученные результаты позволяют дать оценку быстродействия системы подстройки частоты. Получаем, что для предложенного режима вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты максимально отслеживаемое изменение добротности и собственной частоты колебательной системы за время  $\tau$  будет определяться принятыми ограничениями (4), (5), т. е. когда

$$\Psi_y = y_a(Q(0), \omega_0(0)) - y_a(Q(\tau), \omega_0(\tau)), \quad (16)$$

$$\Psi_\varphi = \varphi(Q(0), \omega_0(0)) - \varphi(Q(\tau), \omega_0(\tau)). \quad (17)$$

При этом максимальная ошибка установления частоты выходного сигнала генератора, равной собственной частоте колебательной системы (при выполнении условия (9)), будет не более шага перестройки генератора  $\Delta\omega$ .

Необходимо отметить, что даже при отклонении частоты выходного сигнала генератора от значения собственной частоты колебательной системы возможно вычисление точных значений добротности и собственной частоты по выражениям, полученным из (1) и (2) [13]:

$$\xi^2 = 1 \pm \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{y_a}{y_{cm}}\right)^2 [1 + \text{tg}^2(\varphi)]}},$$

" + " для  $\varphi > \pi/2$ ,

" - " для  $\varphi \leq \pi/2$ .

$$Q = \frac{\xi}{\sqrt{(y_{cm}/y_a)^2 - (1 - \xi^2)^2}} \quad (19)$$

или

$$Q = \frac{\xi}{(1 - \xi^2) \text{tg}(\varphi)}. \quad (20)$$

Видно, что для вычислений необходимо знать значение разности фаз, амплитуды и частоты вынужденных колебаний, а также статическое смещение.

Таким образом, погрешность вычисления параметров колебательной системы при неточной установке частоты выходного сигнала генератора, равной собственной частоте колебательной системы, будет зависеть только от шумов в измеряемых трактах  $\Psi_y$  и  $\Psi_\varphi$ .

С помощью выражения (18) после каждого измерения амплитуды вынужденных колебаний и разности фаз можно вычислять и устанавливать частоту выходного сигнала генератора, равной собственной частоте колебательной системы. При этом шаг перестройки частоты генератора  $\Delta\omega$  может быть выбран таким, чтобы вызываемое измене-

ние разности фазы при перестройке  $\Delta\varphi(\Delta\omega)$  было меньше, чем шумы  $\Psi_\varphi$  в тракте измерения разности фаз:

$$\Delta\varphi(\Delta\omega) \leq \Psi_\varphi. \quad (21)$$

Очевидно, что данный способ перестройки потребует больших вычислительных мощностей, относительно ранее предложенного способа. При этом величина перестройки частоты генератора в обоих случаях будет примерно одна и та же, соответствующая условию (9).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы была произведена оценка быстродействия предложенного режима вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты для электромеханического вибровискозиметрического датчика. Дан анализ погрешности вычисления параметров колебательной системы при неточной установке частоты генератора, равной собственной частоте колебательной системы. Показан способ вычисления текущего значения добротности и собственной частоты по результатам измерения амплитуды вынужденных колебаний и разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом колебательной системы. Для предложенного режима сформулировано условие рационального выбора шага перестройки частоты выходного сигнала генератора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Y., Panaitov G., Zhang Y. and all. Design and fabrication of in-plane resonant microcantilevers // *Microelectronics Journal*. – 2008. – Vol. 39, Is.1. – pp. 44–48.
2. Tao Y, Li X., Xu T. and all. Resonant cantilever sensors operated in a high-Q in-plane mode for real-time bio/chemical detection in liquids // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2011. – Vol. 157, Iss. 2. – pp. 606–614.
3. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. and all. A resonating rheometer using two polymer membranes for measuring liquid viscosity and mass density // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2011. – Vol. 172. – pp. 82–87.
4. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. and all. Tunable resonators in the low kHz range for viscosity sensing // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2012 – Vol. 186. – pp. 111–117.
5. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. and all. Application of resonant steel tuning forks with circular and rectangular cross sections for precise mass density and viscosity measurements // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2015 – Vol. 226. – pp. 163–174.
6. Abdallah A., Reichel E.K., Voglhuber-Brunnmaier T. and all. Symmetric mechanical plate resonators for fluid sensing // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2015 – Vol. 232. – pp. 319–328.
7. Verma V.K., Yadava R.D.S. Stochastic resonance in MEMS capacitive sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2016 – Vol. 235. – pp. 583–602.
8. Миниатюрный вибровискозиметрический датчик повышенной чувствительности и быстродействия / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // *Датчики и системы*. – 2015 – № 7 (194). – С. 35–39
9. Камертонный вибровискозиметрический датчик для исследования термостимулированных процессов в жидкостях / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 26–30.
10. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. and all. Reduced order models for resonant viscosity and mass density sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2014. – Vol. 220. – pp. 76–84.
11. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. and all. Modeling and Experimental Investigation of Resonant Viscosity and Mass Density Sensors Considering their Cross-Sensitivity to Temperature. // *EUROSENSORS 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers*. – 2014. – Vol. 87. – pp. 472–475.
12. Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков // *Автоматизация в промышленности*. – 2004. – № 12. – С. 24–29.
13. Иориш Ю.И. Виброметрия. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 756 с.
14. Пат. 2419781 РФ, МПК G01N25/02. Вибровискозиметрический датчик / Соломин Б.А., Конторович М.Л., Подгорнов А.А. ; патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. – заявка 2008137896 ; заявл. 22.09.2008 ; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15.
15. Соловьев А.Н., Каплун А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1970.
16. Аппаратно-програмный комплекс для оперативного исследования теплофизических свойств жидкости / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // *Измерительная техника*. – 2014. – № 3. – С. 49–52.
17. Пат. 2416092 РФ, МПК G01N27/22. Способ диэлькометрического контроля влажности материалов / Иванов Б.Р., Лисичкин В.Г., Шведов С.Н. ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). – заявка 2010103260/28 ; заявл. 01.02.2010 ; опубл. 10.04.2011, Бюл. 10.
18. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех / пер. с англ. А.Н. Рободзея. – М. : Додэка-XXI, 2011 – 544 с.
19. Зацеклянный О.В. Исследование путей расширения диапазона вязкости вибрационного плотномера // *Сб. тезисов VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»*. – Ростов-на-Дону, 2012. – С. 45–48.

20. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей : учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 1982 – 280 с.

21. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских [и др.] ; под ред. В.А. Кузнецова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.

22. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство / пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

23. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 2. – М. : Мир, 1983. – 257 с.

24. Фролов И.В. Средства измерения малосигнальных и шумовых параметров светоизлучающих диодов для целей диагностики их качества : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 : защищена 18.06.14. – Ульяновск, 2014. – 169 с.

## REFERENCES

1. Wu Y., Panaitov G., Zhang Y. et al. Design and Fabrication of In-Plane Resonant Microcantilevers. *Microelectronics Journal*, 2008, vol. 39, iss.1, pp. 44–48.

2. Tao Y, Li X., Xu T. et al. Resonant Cantilever Sensors Operated in a high-Q In-Plane Mode for Real-Time Bio/Chemical Detection in Liquids. *Sensors and Actuators B. Chemical*, 2011, vol. 157, iss. 2, pp. 606–614.

3. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. et al. A Resonating Rheometer Using Two Polymer Membranes for Measuring Liquid Viscosity and Mass Density. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2011, vol. 172, pp. 82–87.

4. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. et al. Tunable Resonators in the Low kHz Range for Viscosity Sensing. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2012, vol. 186, pp. 111–117.

5. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. et al. Application of Resonant Steel Tuning Forks with Circular and Rectangular Cross Sections for Precise Mass Density and Viscosity Measurements. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2015, vol. 226, pp. 163–174.

6. Abdallah A., Reichel E.K., Voglhuber-Brunnmaier T. et al. Symmetric Mechanical Plate Resonators for fluid Sensing. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2015, vol. 232, pp. 319–328.

7. Verma V.K., Yadava R.D.S. Stochastic Resonance in MEMS Capacitive Sensors. *Sensors and Actuators B. Chemical*, 2016, vol. 235, pp. 583–602.

8. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Kontorovich M.L., Chertoriiskii A.A. Miniatiurnyi vibroviskozimetriceskii datchik povyshennoi chuvstvitelnosti i bystrodeistviia [Miniature High-Sensitivity and High-Speed Vibrating Viscosimetric Sensor]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2015, no. 7 (194), pp. 35–39

9. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Kontorovich M.L., Chertoriiskii A.A. Kamertonnyi vibroviskozimetriceskii datchik dlia issledovaniia termostimulirovannykh protsessov v zhidkostiakh [Pitchfork Vibro-Viscosimetric Sensor for Investigation of Thermally Induced Processes in Liquids]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proc. of Samara

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 26–30.

10. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. et al. Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2014, vol. 220, pp. 76–84.

11. Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. et al. Modeling and Experimental Investigation of Resonant Viscosity and Mass Density Sensors Considering their Cross-Sensitivity to Temperature. *EUROSENSORS 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers*. 2014, vol. 87, pp. 472–475.

12. Lopatin S.S., Pfeiffer H. Datchiki predelnogo urovnia dlia zhidkosti. Fizicheskie printsipy raboty i vozmozhnosti vibratsionnykh datchikov [Max Level Sensors for Liquids. Physical Operation Principles and Vibro-Sensors Facilities]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti* [Journal Automation in Industry], 2004, no. 12, pp. 24–29.

13. Iorish Iu.I. *Vibrometriia* [Vibrometry]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo mashinostroitelnoi literatury Publ., 1963. 756 p.

14. Russian Federation Patent 2419781 RF, MPK G01N25/02. *Vibroviskozimetriceskii datchik* [Vibroviscosimetric Sensor]. Inventors: Solomin B.A., Kontorovich M.L., Podgornov A.A. Proprietor: Uchrezhdenie Rossiiskoi akademii nauk, The V.A. Kotel'nikov Institut of Radioengineering and Electronics of RAS. Application: No. 2008137896. Date of filing: September 22, 2008. Date of publication: 27.05.2011. Bull. No. 15.

15. Solovev A.N., Kaplun A.B. *Vibratsionnyi metod izmereniia viazkosti zhidkosti* [Vibration Method for the Measuring of Fluid Viscosity]. Novosibirsk, Sibirskoe otdelenie Nauka Publ., 1970.

16. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Kontorovich M.L., Chertoriiskii A.A. Apparato-programnyi kompleks dlia operativnogo issledovaniia teplofizicheskikh svoistv zhidkosti [A Hardware-Software System for the Operational Investigation of the Thermal Properties of a Liquid]. *Izmeritelnaia tekhnika* [Measurement Techniques], 2014, no. 3, pp. 49–52.

17. Russian Federation Patent 2416092 RF, MPK G01N27/22. *Sposob dielkometricheskogo kontroliia vlazhnosti materialov* [The Method of the Dielectric Inspection of Material Moisture]. Inventors: Ivanov B.R., Lisichkin V.G., Shvedov S.N. Proprietor: The State Educational Institution of Higher Professional Education Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation (Akademiia FSO Rossii). Application: 2010103260/28. Date of filing: February 01, 2010. Date of publication: April 10, 2011, Bull. 10.

18. Carter B., Mancini R. *Operatsionnye usiliteli dlia vsekh. Per. s angl. A.N. Robodzeia* [Op AMPS for Everyone. Translated from Engl. by A.N. Robodzeia]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2011. 544 p.

19. Zatserkliannii O.V. Issledovanie putei rasshireniia diapazona viazkosti vibratsionnogo plotnomera [The Study of Viscosity Range Extension Means for a Vibration Densimeter]. *Sb. tezisov VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Aktualnye problemy piezoelektricheskogo priborostroeniia"*

[Proc. of the 8th Sci. Conf. "Actual Problems in Piezoelectric Instrument Making Industry"]. Rostov-na-Donu, 2012, pp. 45–48.

20. Andreev V.S. *Teoriia nelineinykh elektricheskikh tsepei. Ucheb. posobie dlia vuzov* [The Theory of Nonlinear Electric Circuits. Textbook for Higher Educational Institutions]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1982. 280 p.

21. Kuznetsov V.A., Dolgov V.A., Konevskikh V.M. et al. *Izmereniia v elektronike. Spravochnik pod. red. V.A. Kuznetsova* [Measurements in Electronics. Guide edited by V.A. Kuznetsov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 512 p.

22. Tittze U., Schenk K. *Poluprovodnikovaia skhemotekhnika. Spravochnoe rukovodstvo. Per. s nem.*

[Semiconductor Circuit Technology. Guide Translated from Germ.]. Moscow, Mir Publ., 1982. 512 p.

23. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniiakh. T. 2* [Methods and Procedures of Signal Processing when Physical Measurements Vol. 2]. Moscow, Mir Publ., 1983. 257 p.

24. Frolov I.V. *Sredstva izmereniia malosignalnykh i shumovykh parametrov svetoizluchaiushchikh diodov dlia tselei diagnostiki ikh kachestva. Dis. kand. tekhn. nauk* [Measurement Instrumentation for the Low-Signal and Noise Parameters of Light Emitting Diodes to Their Quality Diagnosis. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Ulyanovsk, 2014. 169 p.