

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 534.232:681.518.5

И.В. Брякин¹, И.В. Бочкарев², А.Р. Сандыбаева², Н. Б. Кудайбергенцова²

¹*Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР*

²*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены и проанализированы кинематические и динамические методы вибродиагностики. Показано, что в качестве датчиков перемещения наиболее рациональными являются вихретоковые датчики. Предложен новый динамический способ измерения виброускорения. Его отличие от известных состоит в том, что в качестве элементов возбуждения используют металлические электроды, а их переменным электрическим полем воздействуют на нижний ряд витков обмотки измерительных катушек, причем электромагнитные процессы в них возбуждают на резонансной частоте. Показаны физические процессы, протекающие при реализации предложенного способа виброконтроля, приведено их аналитическое описание. Разработана конструкция датчика, реализующего предложенный способ, представлена блок-схема системы виброакустической диагностики, реализующая возможности предлагаемого динамического способа измерения виброускорения аппаратными средствами. Работоспособность и эффективность разработанного вибродатчика и системы виброконтроля подтверждены экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: вибродиагностика, кинематический и динамический принципы измерения вибрации, вихретоковый вибродатчик, инерционный элемент, элементы возбуждения, резонансная частота, квадратурный детектор, блок дифференцирования с масштабированием

Введение

Качественная диагностика технического состояния оборудования позволяет обеспечить его эффективную эксплуатацию и гарантировать работоспособность в течение заданного времени [1, 2]. Актуальность своевременной диагностики непосредственно в условиях эксплуатации объясняется постоянно растущими требованиями к надежности и безопасности технических устройств и систем, поскольку она сводит к минимуму риски непредвиденных отказов и последующих простоев оборудования.

Одним из эффективных современных методов диагностики, который даёт наиболее полные данные о состоянии диагностируемых объектов, работа которых сопровождается возникновением механических колебаний, является вибродиагностика [3, 4]. Это обусловлено тем, что показатели вибрации содержат огромный объем диагностической информации. Вибродиагностика является наиболее часто используемым методом профилактического обслуживания, поскольку обеспечивает возможность диагностики неисправностей, особенно на ранних стадиях, и снижает тем самым затраты на техническое обслуживание и простои, а также позволяет обоснованно принимать решения о необходимости ремонта или полной замене оборудования. Анализ показал, что путем контроля механических колебаний оборудования можно определить значительное количество их возможных отказов [5, 6]. Именно поэтому в настоящее время вибрационная диагностика составляет основу неразрушающего контроля вращающегося оборудования. При этом следует подчеркнуть, что вибродиагностика используется во многих отраслях промышленности – в машиностроении, энергетике, транспорте, авиационной и космической техники, строительстве, и применима практически к любому техническому объекту, причем не только к вращающемуся или перемещающемуся, но и к неподвижному, например, к зданиям и различным сооружениям [7 - 10]. Таким образом, разработка системы виброакустической диагностики оборудования с улучшенными эксплуатационными

показателями является важной и актуальной задачей, имеющей большую практическую ценность.

Цель исследования

В общем случае система контроля вибрации содержит три блока (рис. 1):

- первичный измерительный преобразователь (ПИП);
- вторичный измерительный преобразователь (ВИП);
- блок регистрации и анализа данных (БРАД).

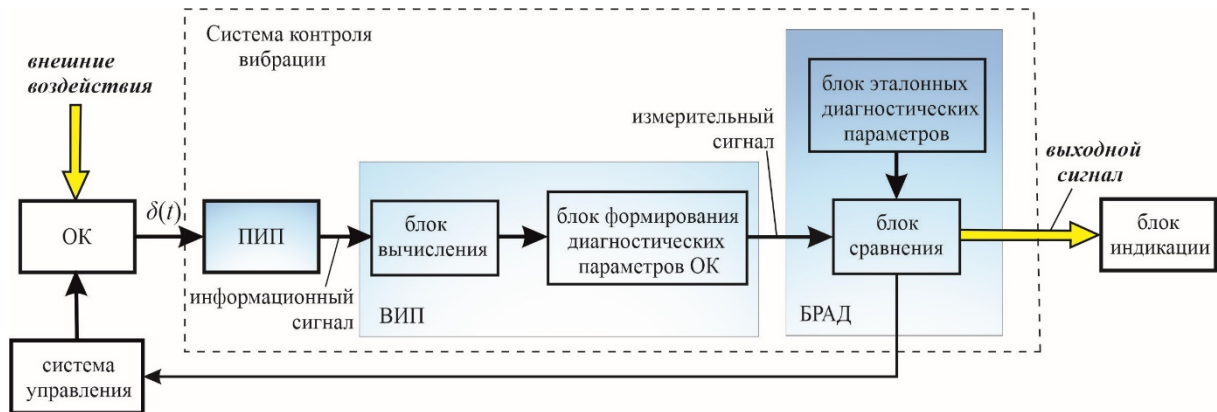


Рисунок 1 – Функциональная структура системы вибродиагностики

Каждый из указанных блоков выполняет свои определенные функции:

- ПИП предназначен для регистрации вибрации объекта контроля (ОК) и фиксирования характеристик этой вибрации путем преобразования механического вибрационного движения в электрический информационный сигнал. В сущности, ПИП – это измерительный датчик вибрации (вибропреобразователь), который непосредственно взаимодействует с ОК и воспринимает его вибрацию;
- ВИП осуществляет обработку информационного сигнала, вычисление параметров вибрации (относительного перемещения, виброскорости, виброускорения и др.) и формирования соответствующего измерительного сигнала;
- БРАД производит анализ данных, содержащихся в выходном сигнале, и вывод информации о вибрации в удобном для пользователя виде.

В систему виброконтроля обычно входит устройство представления информации об измеренных параметрах вибрации ОК, например, визуальной, в виде блока индикации. Кроме того, система может содержать также систему управления, которая осуществляет управление ОК по результатам вибрационного контроля.

Чувствительность и точность системы контроля вибрации определяется параметрами всех указанных блоков, однако очевидно, что в первую очередь метрологические возможности ПИП играют решающую роль. Поэтому основная цель работы заключается в разработке нового способа измерения виброускорения с улучшенными метрологическими свойствами и конструкции вибродатчика для его реализации, а также варианта принципиального аппаратного решения системы виброакустической диагностики оборудования с использованием этого датчика.

Способы вибродиагностики

Современные технологии и условия эксплуатации оборудования требуют при проведении вибродиагностики непрерывного контроля за многими параметрами периодических перемещений исследуемого объекта в пространстве, основными из которых являются амплитуда и частота вибрации.

Существует два принципа измерения вибрации: кинематический и динамический [11]. Их различие заключается в выборе системы координат:

- в первом случае измерения вибрации контролируемого объекта выполняют относительно системы координат, связанной с другим неподвижным объектом, на связанном с контролируемым. Следовательно, производится измерение относительной вибрации двух объектов;

- во втором случае параметры вибрации измеряют относительно системы координат, связанной с объектом, в качестве которого обычно принимают инерционный элемент, связанный с контролируемым объектом через упругий подвес и условно принятым за неподвижный. Таким образом, при динамическом принципе производят измерение абсолютной вибрации.

Кинематический способ измерения вибрации реализуют посредством использования оптических и радиоволновых электромагнитных полей. Например, для реализации оптических полей используют источник излучения, приёмную оптическую схему и электронную схему обработки данных [12 - 14]. Колебания отражающей поверхности модулируют частотный сдвиг, а посредством электронной обработки этого сигнала получают параметры вибрационных колебаний. Такие способы контроля вибрации и соответствующие волоконно-оптические датчики имеют высокую помехозащищённость и нечувствительны к электромагнитным помехам, и их можно использовать в опасных средах. Однако эти способы и устройства обладают целым рядом недостатков: сложность и громоздкость, высокая стоимость, необходимость сложной юстировки и настройки, большое энергопотребление, высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта.

Поэтому на практике более предпочтительными являются динамические способы и устройства измерения вибрации, работающие на принципе перемещения инерционной массы при изменении величины ускорения ОК и генерирования электрического сигнала, пропорционального величине ускорения контролируемого объекта.

Для практической реализации динамических способов виброконтроля используют датчики с применением различных физических эффектов. Эти датчики различаются типом чувствительного элемента, который преобразует виброперемещения ОК в электрический сигнал. Наиболее распространёнными являются следующие:

- пьезоэлектрические, работа которых основана на пьезоэлектрическом эффекте, за счёт которого при механическом воздействии на чувствительном пьезоэлементе формируется электрический заряд, пропорциональный силе воздействия;

- вихретоковые, работа которых основана на наведении вихревых токов в подвижном проводящем элементе, колеблющемся под воздействием вибрации, что создаёт изменения в электромагнитном поле;

- индукционные, основанные на контроле изменения индуктивности катушки под действием вибрации;

- конденсаторные (ёмкостные), работа которых основана на изменении зазора между обкладками конденсатора за счёт вибрации;

- магнитострикционные, работа которых основана на создании импульса деформации кручения волновода при взаимодействии магнитных полей волновода и подвижного позиционного магнита.

Проведённый анализ показал, что в качестве датчиков вибрации оборудования наиболее рациональными являются вихретоковые датчики, поскольку являются универсальными бесконтактными устройствами, обеспечивают высокий сигнал на низких частотах и хорошее отношение сигнал/шум, а также имеют высокую надёжность. Такие датчики идеально подходят для высокоскоростных измерений вибрации с высоким разрешением. Однако известные динамические способы измерения ускорения и вибродатчика для их реализации имеют недостаточные метрологические свойства. Это обусловлено выполнением элементов возбуждения в виде многовитковых катушек,

собственные параметры которых в значительной степени зависят от их температуры и других внешних дестабилизирующих факторов, которые могут изменяться в процессе измерения, что существенно снижает точность измерений в целом. Наличие индуктивных и емкостных паразитных связей, обусловленных конструктивными особенностями компоновки набора индуктивных элементов в виде соответствующих катушек, является дополнительным ухудшающим фактором влияния как на чувствительность вибродатчика, так и на точность самих измерительных преобразований.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ показывает, что существует проблема повышения точности измерения вибродатчиков, а также увеличение их чувствительности и помехоустойчивости. Для решения этой проблемы был предложен новый динамический способ измерения виброускорения. Его отличие от известных состоит в том, что в качестве элементов возбуждения используют металлические электроды, переменным электрическим полем которых воздействуют на нижний ряд витков обмотки измерительных катушек, причем электромагнитные процессы реализуют на резонансной частоте. При этом измерительные катушки создают рабочее переменное магнитное поле, взаимодействие которого с инерционным элементом приводит к появлению в измерительных обмотках ЭДС взаимной индукции, алгоритмическая обработка которых позволяет получить величину виброускорения контролируемого объекта.

Сущность предлагаемого способа поясняется структурной блок-схемой, показанной на рисунке 2.

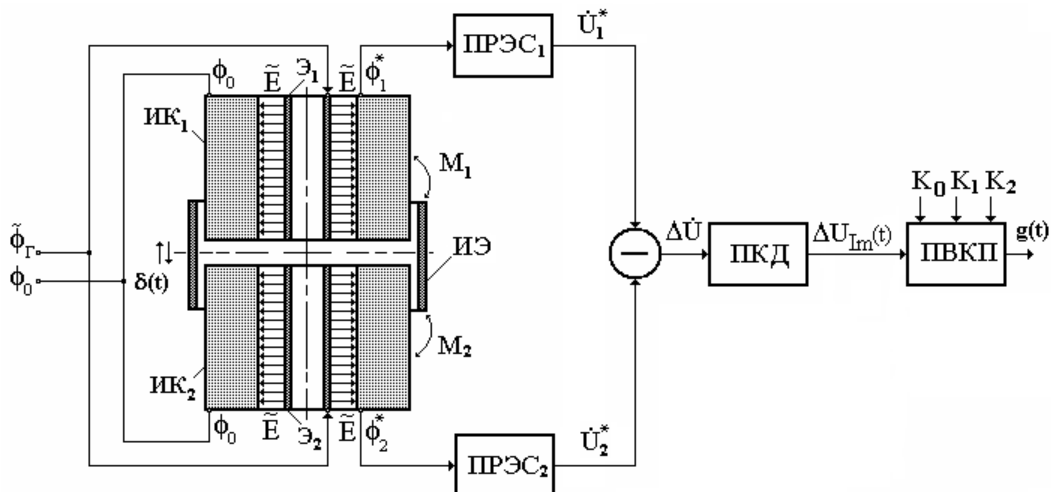


Рисунок 2 – Структурная блок-схема предлагаемого динамического способа измерения виброускорения:

ИЭ – инерционный элемент; ИК₁ и ИК₂ – измерительные катушки; Э₁ и Э₂ – металлические электроды возбуждения; М₁ и М₂ – взаимные индуктивности между инерционной массой и соответствующими измерительными катушками; $\delta(t)$ – относительное перемещение инерционного элемента и вибрирующего объекта; $g(t)$ – ускорение перемещения вибрирующего объекта в абсолютной системе координат

На рисунке использованы следующие обозначения: PRЭС₁ и PRЭС₂ – процедуры регистрации электрических сигналов на соответствующих обмотках измерительных катушек ИК₁ и ИК₂; ПКД – процедура квадратурного детектирования; ПВКП – процедура вычисления контролируемого параметра $g(t)$; $\tilde{\Phi}_\Gamma$ – переменный потенциал заряда на Э₁ и Э₂,

создаваемый активным выходом генератора возбуждения; φ_0 – нулевой потенциал пассивного выхода генератора возбуждения; \tilde{E} – напряженности переменных электрических полей, создаваемых электрическими зарядами металлических электродов возбуждения; φ_1^* и φ_2^* – переменные электрические потенциалы индуцированных зарядов на витках нижнего ряда обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; \dot{U}_1^* и \dot{U}_2^* – суммарные первый и второй электрические сигналы на соответствующих обмотках ИК₁ и ИК₂; $\Delta\dot{U}$ – разностная величина между электрическими сигналами \dot{U}_1^* и \dot{U}_2^* ; $\Delta U_{\text{Im}}(t)$ – реактивная составляющая разностной величины напряжений $\Delta\dot{U}$; K_0 – коэффициент измерительного преобразования; $K_1 = 2 \cdot \omega_0 \cdot \beta$ и $K_2 = \omega_0^2$ – постоянные коэффициенты; $\omega_0 = \sqrt{w/m}$ – собственная циклическая частота колебаний ИЭ; w – жесткость упругих элементов; m – масса ИЭ; β – степень затухания колебаний ИЭ.

Предлагаемый динамический способ измерения виброускорения осуществляют следующим образом. Посредством металлических электродов Э₁ и Э₂ из немагнитного материала, обладающих зарядом с переменным потенциалом $\tilde{\varphi}_r$, изменяющимся по синусоидальному закону, создают переменные электрические поля, которыми наводят на витках нижнего ряда обмоток каждой измерительной катушки ИК₁ и ИК₂ заряды с соответствующими переменными потенциалами φ_1^* и φ_2^* относительно нулевого потенциала $\varphi_0=0$ объединенных концов верхнего ряда этих обмоток, создавая при этом между концами обмоток каждой измерительной катушки соответствующие разности потенциалов, равные:

$$\Delta\varphi_1^* = \varphi_1^* - \varphi_0 \text{ и } \Delta\varphi_2^* = \varphi_2^* - \varphi_0. \quad (1)$$

Под воздействием созданных разностей потенциалов $\Delta\varphi_1^*$ и $\Delta\varphi_2^*$ соответственно в электрических цепях каждой из обмоток измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ возбуждают на частоте последовательного резонанса ω этих электрических цепей соответствующие электрические переменные токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , посредством которых в окружающем пространстве первой и второй измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ создают соответствующие переменные магнитные поля, которыми воздействуют на инерционный элемент ИЭ из немагнитного электропроводящего материала, инициируя тем самым появление в нем вихревых токов \dot{I}_0 .

Режим резонансного возбуждения электрических токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 является тем необходимым условием, при котором $\tilde{\varphi}_r \rightarrow \varphi_1^*$ и $\tilde{\varphi}_r \rightarrow \varphi_2^*$, а $\dot{I}_1 \rightarrow \max$ и $\dot{I}_2 \rightarrow \max$.

Вихревыми токами возбуждают вторичные (переизлученные) переменные магнитные поля, которыми воздействуют на измерительные катушки ИК₁ и ИК₂ и наводят в них соответствующие ЭДС взаимной индукции.

Осуществляют процедуры регистрации (ПРЭС₁ и ПРЭС₂) первого и второго суммарных электрических сигналов на соответствующих обмотках первой и второй измерительных катушек:

$$\dot{U}_1^* = \dot{U}_1 - \dot{e}_{1\text{и}} = \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) - \dot{e}_{1\text{и}}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_2^* = \dot{U}_2 - \dot{e}_{2\text{и}} = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) - \dot{e}_{2\text{и}}, \quad (3)$$

где \dot{U}_1 и \dot{U}_2 – электрические напряжения, возникающие соответственно на обмотках первой и второй измерительных катушек в результате протекания в них возбужденных переменных электрических токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 ; $R_1 = R_2 = R$ – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; $L_1 = L_2 = L$ – индуктивности соответственно первой и второй измерительных катушек ИК₁ и ИК₂; $\dot{e}_{1\text{и}}$ и $\dot{e}_{2\text{и}}$ – ЭДС взаимной индукции, наведенные соответственно в обмотках первой и второй измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ в результате электродинамического взаимодействия между инерционным элементом ИЭ и каждой измерительной катушкой.

Индуктивность измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ равна

$$L = \mu \cdot w^2 \cdot l / S, \quad (4)$$

где μ – магнитная проницаемость магнитопровода; w , l и S – соответственно количество витков, длина измерительных катушек и площадь их внутреннего сечения.

Определяют разностную величину $\Delta \dot{U}$ между электрическими сигналами \dot{U}_1^* и \dot{U}_2^* :

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1^* - \dot{U}_2^* = \dot{e}_{2И} - \dot{e}_{1И} = \Delta \dot{e}_{И}, \quad (5)$$

где $\Delta \dot{e}_{И}$ – результирующая ЭДС взаимной индукции.

Величина $\Delta \dot{U}$ зависит от положения ИЭ:

- в исходном положении, при отсутствии вибрации и, соответственно, при неподвижном и симметричном положении ИЭ относительно измерительных катушек ИК₁ и ИК₂, будет $\dot{e}_{1И} = \dot{e}_{2И}$, следовательно $\Delta \dot{e}_{И} = 0$;

- при периодических пространственных смещениях ИЭ относительно исходного положения вследствие вибрации будет $\dot{e}_{1И} \neq \dot{e}_{2И}$ и, соответственно, $\Delta \dot{e}_{И} \neq 0$.

Как будет показано ниже, ускорение перемещения вибрирующего объекта $g(t)$ характеризуется мнимой составляющей $\text{Im}(\Delta \dot{U})$ разностной величины напряжений $\Delta \dot{U}$. Поэтому осуществляют процедуру квадратурного детектирования и регистрируют эту реактивную составляющую $\Delta U_{\text{Im}}(t)$, пропорциональную величине перемещения массивного элемента ИЭ относительно измерительных катушек ИК₁ и ИК₂. После этого посредством процедуры вычисления контролируемого параметра ПВКП определяют ускорение перемещения контролируемого объекта в абсолютной системе координат.

Для более полного понимания сути предлагаемого способа измерения виброускорения и получения аналитической формулы для расчета величины ускорения перемещения контролируемого объекта в абсолютной системе координат $g(t)$ рассмотрим особенности физических эффектов, на которых основывается этот способ.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа взаимосвязь между ИК₁ и ИЭ можем описать выражениями:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^* = \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) - j \cdot \omega \cdot M_1 \cdot \dot{I}_{01}; \\ j \cdot \omega \cdot M_1 \cdot \dot{I}_1 - (r_0 + j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot \dot{I}_{01} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где L_0 и r_0 – индуктивность и активное сопротивление инерционного элемента ИЭ в виде элементарного витка; \dot{I}_{01} – вихревой ток, наводимый в ИЭ магнитным полем ИК₁; M_1 – коэффициент взаимоиנדукции между ИЭ и ИК₁.

Индуктивность ИЭ определяется его геометрическими размерами,

где μ_0 – магнитная проницаемость инерционного элемента ИЭ; d_0 и l_0 – соответственно диаметр и длина инерционного элемента ИЭ. (7)

В результате совместного решения системы уравнений (6) получаем:

$$\dot{U}_1^* = \dot{I}_1 \cdot \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M_1^2}{Z_0^2} \cdot r_0 - j \cdot \frac{\omega^2 \cdot M_1^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 \right), \quad (8)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 \cdot L^2}$ – модуль комплексного сопротивления инерционного элемента ИЭ.

Аналогичным образом взаимосвязь между ИК₂ и ИЭ можем описать следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{U}_2^* = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) - j \cdot \omega \cdot M_2 \cdot \dot{I}_{02}; \\ j \cdot \omega \cdot M_2 \cdot \dot{I}_2 - (r_0 + j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot \dot{I}_{02} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

где M_2 – коэффициент взаимоиנדукции между ИЭ и ИК₂.

В результате совместного решения системы уравнений (8) получаем:

$$\dot{U}_2^* = \dot{I}_2 \cdot \left(R_2 + \frac{\omega^2 \cdot M_2^2}{Z_0^2} \cdot r_0 - j \cdot \frac{\omega^2 \cdot M_2^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 \right). \quad (10)$$

Следует подчеркнуть, что режим последовательного резонансного возбуждения электрических токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , при котором получают $\dot{I}_1 \rightarrow \max$ и $\dot{I}_2 \rightarrow \max$, увеличивает величины \dot{U}_1^* и \dot{U}_2^* , улучшая тем самым чувствительность предлагаемого способа динамического измерения виброускорения.

Поскольку $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}$, то в соответствии с (8) и (10) величина $\Delta \dot{U}$ равна:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1^* - \dot{U}_2^* = \frac{\dot{I} \cdot \omega^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \cdot (M_1^2 - M_2^2) - j \cdot \frac{\dot{I} \cdot \omega^3}{Z_0^2} \cdot L_0 \cdot (M_1^2 - M_2^2), \quad (11)$$

где $M_1^2 = k_1^2 \cdot L_1 \cdot L_0$; $M_2^2 = k_2^2 \cdot L_2 \cdot L_0$; $k_1 = k_0 \cdot (l^* - \delta)$ и $k_2 = k_0 \cdot (l^* + \delta)$ – коэффициенты связи между ИЭ и ИК₁ и между ИЭ и ИК₂; δ – линейное перемещение ИЭ относительно своего нейтрального положения, $l^* = (l - l_0)$ – часть длины измерительных катушек внутри ИЭ при его нейтральном положении, l_0 – часть длины измерительных катушек вне ИЭ при его нейтральном положении; k_0 – конструктивный коэффициент измерительных катушек.

В обобщенном варианте уравнение (11) можно представить в следующем виде:

$$\Delta \dot{U} = \text{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \text{Im}(\Delta \dot{U}). \quad (12)$$

Из анализа выражения (10) следует, что наиболее чувствительным компонентом $\Delta \dot{U}$ к измеряемому параметру δ является его мнимая составляющая $\text{Im}(\Delta \dot{U})$. Поэтому для дальнейшего контроля вибрационных параметров регистрируют только реактивную составляющую $\Delta U_{\text{Im}}(t)$, пропорциональную величине относительного перемещения вибрирующего объекта и инертного элемента:

$$\Delta U_{\text{Im}}(t) = -K_0 \cdot \delta(t), \quad (13)$$

где K_0 – коэффициент измерительного преобразования.

Из выражения (13) получаем необходимую зависимость:

$$\delta(t) = -\Delta U_{\text{Im}}(t) \cdot K_0^{-1}. \quad (14)$$

В соответствии с базовым дифференциальным уравнением свободных затухающих колебаний уравнение динамического равновесия ИЭ при его линейном перемещении имеет вид:

$$\frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + 2 \cdot \omega_0 \cdot \beta \cdot \frac{d\delta(t)}{dt} + \omega_0^2 \cdot \delta(t) = -g(t), \quad (15)$$

где $g(t)$ – ускорение перемещения контролируемого объекта в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{w/m}$ и β – собственная циклическая частота и степень затухания колебаний ИЭ; w – жесткость упругих элементов, m – масса ИЭ.

Подставив (14) в (15), получим:

$$g(t) = K_0^{-1} \cdot [\Delta U_{\text{Im}}''(t) + 2 \cdot \omega_0 \cdot \beta \cdot \Delta U_{\text{Im}}'(t) + \omega_0^2 \cdot \Delta U_{\text{Im}}(t)], \quad (16)$$

где $\Delta U_{\text{Im}}(t)$ – реактивная составляющая разностной величины между ЭДС взаимной индукции; $\Delta U_{\text{Im}}'(t)$ и $\Delta U_{\text{Im}}''(t)$ – первая и вторая производные реактивной составляющей $\Delta U_{\text{Im}}(t)$; K_0 – коэффициент измерительных преобразований.

Таким образом, полученное выражение (16), основанное на анализе всех физических процессов, подтверждает работоспособность предлагаемого способа измерения виброускорения и позволяет вычислить величину виброускорения контролируемого объекта.

Следует отметить, что поскольку измерительные катушки ИК₁ и ИК₂ неподвижны относительно контролируемого объекта, то первая производная $\Delta U_{\text{Im}}'(t)$ и вторая производная $\Delta U_{\text{Im}}''(t)$ пропорциональны соответственно относительной скорости и ускорению этого объекта, вызванными его вибрацией.

Датчик для реализации предложенного способа измерения виброускорения показан на

рисунке 3. Особенностью конструкции датчика является выполнение элементов возбуждения 5 и 6 в виде разрезных тонкостенных цилиндрических металлических электродов, а инерционного элемента 7 – в виде металлического кольца.

Конструктивные элементы 1, 2 и 9 в своей совокупности образуют разъемный магнитопровод вибродатчика, на внутренней центральной части которого коаксиально располагаются диэлектрическая втулка 10, на которой закреплены электроды возбуждения 5 и 6, а также измерительные катушки 3 и 4. Инерционный элемент 7 закреплен на упругом подвесе 8 и имеет возможность под действием вибраций совершать осевые перемещения относительно катушек 3 и 4. Упругий подвес 8 выполнен в виде мембраны и является подвесом с направленным ходом инерционного элемента [15]. Упругий подвес жестко фиксируется на торцевой поверхности одного из броневого сердечников, что обеспечивает нейтральное пространственное положение инерционного элемента 7 относительно измерительных катушек.

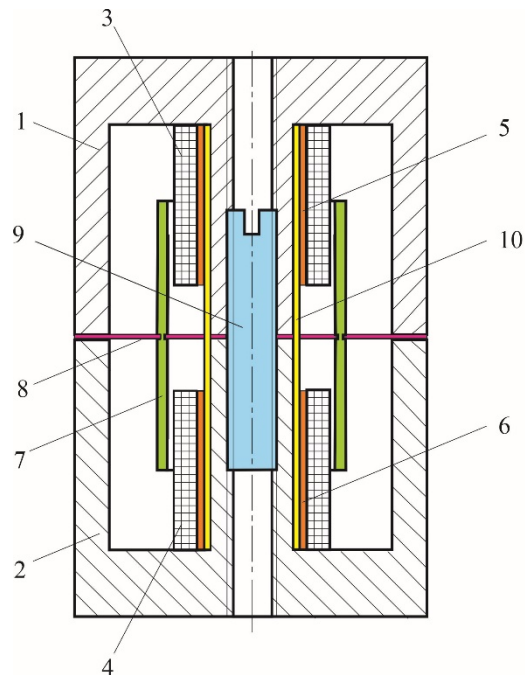


Рисунок 3 – Конструкция датчика для реализации предложенного способа измерения виброускорения:

1 и 2 – ферритовые броневого сердечники; 3 и 4 – измерительные катушки;
5 и 6 – элементы возбуждения; 7 – инерционный элемент; 8 – упругий подвес
в виде плоской мембраны из бериллиевой бронзы; 9 – резьбовой ферритовой
стержень (ФС); 10 – диэлектрическая втулка в виде тонкостенного цилиндра

Погрешность, вызванную наличием нулевого выходного сигнала, устраняют за счет реализации специальной процедуры предварительного перераспределения магнитного сопротивления в магнитной цепи измерительных катушек путем принудительного осевого перемещения ферритового стержня 9 во внутреннем пространстве измерительных катушек.

Датчик фактически реализует предлагаемый способ измерения виброускорения. Рассмотрим основные особенности его функционирования.

Металлическими электродами 5 и 6 с зарядами с переменным потенциалом, изменяющимся по синусоидальному закону, создают переменные электрические поля, которыми наводят на витках нижнего ряда обмоток каждой измерительной катушек заряды с соответствующими переменными потенциалами. При этом концы верхнего ряда обмоток

каждой измерительной катушки имеют общую точку соединения с нулевым потенциалом генератора (см. рис. 1). В этом случае между концами обмоток каждой измерительной катушки возникает соответствующая разность потенциалов, которая приводит к возбуждению в каждой обмотке соответствующего электрического переменного тока. Посредством этих электрических токов во внутреннем пространстве датчика, ограниченном ферритовыми броневыми сердечниками 1 и 2, создаются соответствующие переменные магнитные поля, наводящие в инерционном элементе 7 вихревые токи. Эти вихревые токи, в свою очередь, возбуждают переизлученное (вторичное) переменное магнитное поле, инициирующее процесс взаимоиндукции между соответствующей измерительной катушкой и инерционным элементом 7.

Для контроля вибрации датчик закрепляют на контролируемом объекте, например, на внешней поверхности оборудования. В том случае, если объект не испытывает вибрации, инерционный элемент занимает начальное нейтральное пространственное положение относительно измерительных катушек, и разница потенциалов между одноименными входными концами обмоток измерительных катушек, которые и являются информационными выходами датчика, будет равна нулю.

При наличии вибрации объекта контроля будут происходить осевые смещения инерционного элемента, вызванного вибрационными возмущениями, за счет чего возникает существенная разница потенциалов между информационными выходами измерительных катушек. При этом характер смещения инерционного элемента будет адекватным образом отражаться в законе изменения разницы потенциалов между одноименными входными концами обмоток измерительных катушек, в соответствии с которым в дальнейшем и определяются параметры вибрационного возмущения.

Таким образом, предложенный вибродатчик является дифференциальным параметрическим индуктивным преобразователем соленоидного типа [16], в основе работы которого заложен новый способ измерения виброускорения.

Вариант устройства в виде его блок-схемы, реализующего предлагаемый динамический способ измерения виброускорения аппаратными средствами, представлен на рисунке 4.

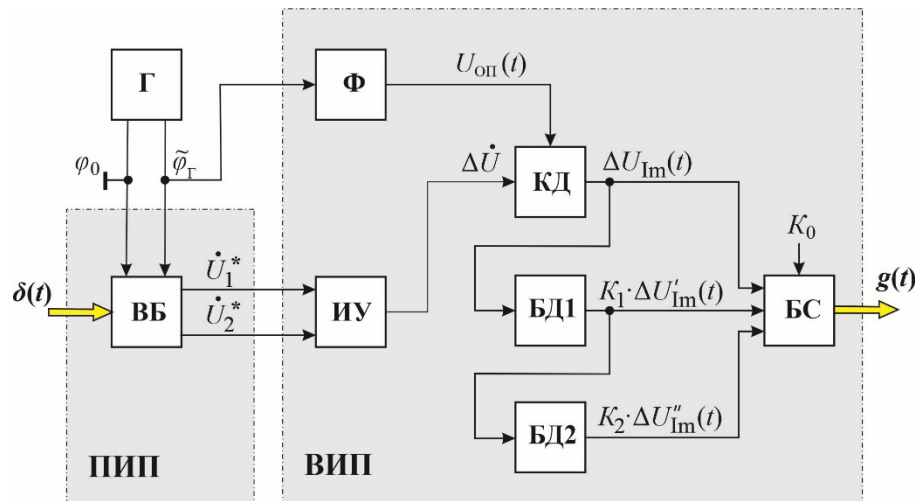


Рисунок 4 – Блок-схема системы виброакустической диагностики

Фактически данное устройство состоит из первичного измерительного преобразователя (ПИП) в виде вибродатчика ВБ, возбуждаемого электрическим генератором Г, и вторичного измерительного преобразователя (ВИП), содержащего следующие функциональные блоки: ИУ – инструментальный усилитель; КД – квадратурный детектор; БД1 – первый блок

дифференцирования с масштабированием; БД2 – второй блок дифференцирования с масштабированием; БС – блок суммирования с масштабированием; Ф – фазовращатель.

Данная блок-схема показывает реализацию последовательных процедур, лежащих в основе предложенного способа динамического способа измерения виброускорения.

Из представленной блок-схемы видно, что после процесса возбуждения датчика ВД посредством электрического генератора Г на выходе вибродатчика ВД регистрируют первый \dot{U}_1^* и второй \dot{U}_2^* электрические сигналы. Каждый из этих сигналов представляет собой сумму двух составляющих, первая из которых является напряжением, возникающим на обмотке соответствующей измерительной катушки в результате протекания в ней возбужденного переменного электрического тока, а вторая составляющая представляет собой ЭДС взаимной индукции, наведенной соответственно на обмотке этой измерительной катушки в результате ее электродинамического взаимодействия с инерционным элементом.

В инструментальном усилителе ИУ указанные сигналы усиливаются и вычитаются, и полученная разностная величина $\Delta \dot{U}$ подается на квадратурный детектор КД, где из нее в соответствии с опорным напряжением $U_{оп}(t)$, получаемого при помощи фазовращателя Ф, выделяется реактивная составляющая $\Delta U_{lm}(t)$. Затем полученный сигнал $\Delta U_{lm}(t)$ дважды дифференцируют при помощи первого блока дифференцирования с масштабированием БД1 и второго блока дифференцирования с масштабированием БД2, на выходе которых получают соответственно сигналы $K_1 \cdot \Delta U'_{lm}(t)$ и $K_2 \cdot \Delta U''_{lm}(t)$. После этого блоком БС определяется ускорение перемещения $g(t)$ контролируемого объекта в абсолютной системе координат в соответствии с выражением (16).

Для определения ускорения перемещения $g(t)$ предварительно в блок БС вводится постоянный коэффициент K_0 , а в блоках БД1 и БД2 определенным образом выставляются постоянные коэффициенты, соответственно K_1 и K_2 .

Для подтверждения работоспособности и эффективности разработанного вибродатчика и системы виброконтроля с его использованием были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Следует отметить, что на точность контроля вибрации значительное влияние оказывают способы крепления вибрационных датчиков. На практике используют различные способы: при помощи шпильки, клеевые соединения, использование промежуточных элементов, при помощи магнитов, при помощи шупа. Было выбрано крепление на шпильку, поскольку оно обеспечивает наиболее рациональную частотную характеристику в исследуемом диапазоне частот [17].

Результаты предварительных экспериментальных исследований показали повышение точности измерения, а также увеличение чувствительности и помехоустойчивости предложенных датчика и системы виброконтроля, реализующих предложенную модификацию динамического способа контроля виброускорения. Например, по сравнению с серийным токовихревым вибродатчиком серии DS абсолютная погрешность измерений относительного линейного перемещения снизилась на 15% и составила ± 20 мкм, а отклонение коэффициента преобразования, вызванное изменением температуры окружающего воздуха, снизилось практически на 20% и составило не более 0,08 %/1°C.

Заключение

Предложен способ виброакустической диагностики, согласно которому измерение виброускорения осуществляют относительно искусственной неподвижной системы отсчета, в качестве которой используют инерционный элемент, закрепленный на упругом подвесе относительно контролируемого объекта. Для создания возбуждающего переменного электрического поля предложено использовать элементы возбуждения в виде разрезных тонкостенных цилиндрических электродов, которые расположены внутри каждой измерительной обмотки и подключены к генератору возбуждения. Этим полем в нижнем слое витков измерительных обмоток индуцируют соответствующие заряды с переменными потенциалами, за счет которых в измерительных катушках возбуждают на частоте

последовательного резонанса рабочие переменные токи. Эти токи создают в окружающем их пространстве соответствующие переменные магнитные поля, воздействуя которыми на инерционный элемент инициируют появление в нем токовихревого эффекта. Это приводит к появлению переизлученного переменного магнитного поля, которым воздействуют на измерительные обмотки и наводят в них соответствующие ЭДС взаимной индукции. Алгоритмическим путем определяют разностную величину между указанными ЭДС, выделяют реактивную составляющую этой величины, и по ней вычисляют взаимное относительное перемещение контролируемого объекта и инерционного элемента. Таким образом, измерительные обмотки дополнительно выполняют функцию создания рабочего переменного поля.

Указанные процессы реализованы в разработанном датчике вибрации, особенностями которого являются следующие качества:

- температурная стабильность выходных параметров за счет перехода от многovitковых катушек возбуждения к элементам возбуждения в виде цилиндрических электродов;
 - высокая чувствительность за счет использования резонансного режима возбуждения рабочих токов в измерительных обмотках;
 - высокий уровень помехозащищенности за счет минимального значения рабочих токов измерительных катушек и квадратурного преобразования информационного сигнала;
 - простая процедура устранения погрешности, вызванной наличием нулевого выходного сигнала, путем предварительного перераспределения магнитного сопротивления в магнитной цепи измерительных катушек, что обеспечивается принудительным осевым перемещением специального ферритового стержня во внутреннем пространстве измерительных обмоток;
 - высокая технологичность за счет отказа от многovitковых катушек возбуждения и возможности выполнения корпуса из стандартных ферритовых броневых сердечников.
- Разработанный датчик вибрации, реализующий новый способ виброконтроля, и предложенная на его базе система вибродиагностики могут использоваться для решения следующих задач:
- для комплексного вибрационного контроля различного оборудования, работа которого сопровождается или возникновением собственных механических колебаний, или которые установлены рядом с другими устройствами, являющимися источниками вибрации;
 - для виброконтроля конструкций зданий и сооружений для выявления деформаций и трещин в конструкциях, оценки износа материалов, выявления нежелательных резонансов и т.д.;
 - для получения геолого-геофизической информации для решения задач сейсморазведки и инженерной геологии.

Литература

1. Науменко А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с.
2. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. – М.: Лань, 2025. – 376 с.
3. Колобов А. Б. Вибромониторинг промышленных машин. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 253 с.
4. Ghazali M. H. M., Rahiman W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*, 2021 (2):1-25. DOI:10.1155/2021/9469318.
5. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 378 с.
6. Сальников А. Ф. Виброакустическая диагностика технических объектов. – ПНИПУ, 2011. – 247 с.

7. Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С. Виброметрические методы диагностики строительных конструкций // Вестник КГЭУ, 2023. – Т. 15, № 3 (59). – С. 175–189.
8. Абрамов И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 81 с.
9. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередачи // Известия вузов. – Проблемы энергетики, 2022. – Т. 24, № 4. – С. 63–76.
10. Овчинников И. Г., Косауров А. П., Суров Д. И. Непрерывный удаленный мониторинг и диагностика технического состояния мостов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2019. — № 3 (29). — С. 16–24.
11. Зусман Г. В., Барков А. В. Вибродиагностика. – М.: Спектр, 2011. – 214 с.
12. Нурзай В.А., Губарев Ф.А., Лей В.А. Оптические методы измерения перемещений для контроля вибрации технологического оборудования // Системы контроля окружающей среды. – 2024. – № 1 (55). – С. 119–130. doi.org/10.33075/2220-5861-2024-1-119-130.
13. Molin N.E. (2014). Optical Methods for Acoustics and Vibration Measurements. In: Rossing, T.D. (eds) Springer Handbook of Acoustics. Springer Handbooks. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_27.
14. O'Donoghue P., Gautier F., Meteyer E. et al. Comparison of three full-field optical measurement techniques applied to vibration analysis. Sci Rep 13, 3261 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30053-9>.
15. Хрусталева Н. В., Шарыгин Л. Н. Применение упругих элементов в средствах измерения. – Владимир: Из-во ВлГУ, 2022. – 162 с.
16. Брякин, И.В. Электродинамический акселерометр // Проблемы автоматики и управления. – 2012. – №2. – С.154–148.
17. Ма Ю., Калиниченко А. Н. Зависимость АЧХ вибродатчиков от способов крепления // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2016. – Т. 1. – С. 322–324.