

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмшин В.Р.³

¹Институт машиноведения и автоматике Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Разакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭЛЕКТРОДНО-ИНДУКТИВНЫЙ ВИБРОДАТЧИК С ЕМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ

Проведен анализ систем виброакустической диагностики. Получено, что наибольший практический интерес представляют датчики вибрационных ускорений (акселерометры) из класса электромагнитных преобразователей, предназначенные для измерения низкочастотных динамических процессов. Предложен новый вариант электродно-индуктивного датчика виброускорения соленоидного типа с упругим подвесом инерционного элемента для измерения низкочастотных динамических процессов. Представлены вариант конструктивного исполнения вибродатчика и его электрическая схема замещения, а также рассмотрен принцип работы вибродатчика. Информативным параметром датчика, на который воздействуют внешние механические колебания, является величина глубины введения якоря-плунжера в полость его измерительной катушки. Для обработки измерительной информации используется мостовая схема, причем в качестве вспомогательных плечевых элементов этой схемы используются емкостные элементы, являющиеся составной частью конструкции самого датчика, что обеспечивает высокий уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам. При этом используется резонансный режим возбуждения измерительных катушек, что обеспечивает высокую чувствительность датчика в целом. Выполнено аналитическое описание основных физических процессов, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения. Предложено использовать дополнительное преобразование информационного сигнала с датчика в виде квадратурного детектирования посредством синхронного детектора

Ключевые слова: вибродатчик, измерительная катушка, инерционный элемент, упругий подвес, межвитковая емкость обмотки, конденсаторы связи измерительных катушек с напряжением питания, мостовая измерительная схема, резонанс, квадратурное детектирование.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы виброакустической диагностики диктуется острой необходимостью организации оперативного безразборного контроля технического состояния машин и механизмов на протяжении всего жизненного цикла от этапов изготовления и эксплуатации, до этапов ремонта и модернизации [1–5].

Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля технического состояния систем с вращательным движением силовых узлов показывает, что для обнаружения возможных отказов наиболее эффективен (до 77%) контроль состояния оборудования именно по параметрам механических колебаний [6–10].

Ориентация на методы виброакустической диагностики, базирующейся именно на принципах безразборности, оперативности и универсальности, позволяет успешно решать поставленные задачи благодаря огромной информационной емкости виброакустических процессов, сопровождающих функционирование машин и механизмов [11–13]. Поэтому работы, направленные на улучшение качества вибродиагностики, являются весьма актуальными и имеют высокую практическую значимость.

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ВИБРОДАТЧИКОВ

Любая система диагностирования с функциональной точки зрения является двухуровневой и состоит фактически из первичной и вторичной подсистем (рис. 1). Первичная подсистема предназначена для сбора информации и регистрации ее на соответствующих физических носителях информации. Она состоит из датчиков колебаний, регистрирующих вибрацию

объекта контроля и преобразующих их в электрический сигнал, различного типа согласующих устройств, усилителей, а также может содержать блоки специализированной обработки информации (фильтрации, стробирования, синхронного накопления, детектирования и т.п.). Вторичная подсистема предназначена для ввода и обработки информации, поступающей с первичной системы, например, переводит ее в цифровой вид, и может включать в себя как ЭВМ, так и набор модулей аналогово-цифровой аппаратуры.

Эффективность диагностирования в основном зависит от качества информации, снимаемой с объекта диагностирования и преобразуемой первичной подсистемой диагностирования, т.е. фактически от выбора датчиков, мест их установки, режимов диагностирования, способов предварительной обработки измерительной информации [14–17].

Как указывалось, неотъемлемой частью первичной подсистемы диагностирования являются датчики колебаний, преобразующие различные механические величины (виброскорость, виброперемещения и виброускорения) в электрические. При измерении параметров вибрации широко используются пьезоэлектрические, электромагнитные и емкостные вибропреобразователи.



Рис. 1. Функциональная схема системы вибродиагностики

В настоящее время для измерения параметров вибрации в основном используются три типа датчиков: 1 – акселерометры (для измерения виброускорения); 2 – велосиметры (для измерения виброскорости); 3 – проксиметры (для измерения виброперемещений).

При диагностировании машин и оборудования вибрацию разделяют на низкочастотную, среднечастотную, высокочастотную и ультразвуковую. Это обусловлено тем, что в каждой области частот вибрация имеет свои физические особенности, оказывающие значительное влияние на выбор вибродиагностических параметров и методов диагностирования. Особое внимание специалисты уделяют низкочастотной вибрации, особенностью которой являются колебания контролируемого оборудования или его элементов под действием вынуждающей силы как единого целого. Кроме того, низкочастотная вибрация различного типа оборудования содержит преимущественно гармонические составляющие, создаваемые вынуждающими силами, часть которых зависит от технического состояния именно самого оборудования. Диагностическими параметрами низкочастотных составляющих вибрации чаще всего являются амплитуды колебаний на определенных частотах, пропорциональные величине соответствующих вынуждающих сил. В зависимости от размеров и сложности формы контролируемого оборудования низкочастотные колебания имеют частоты ниже 100–300 Гц.

Исторически так сложилось, что особый интерес у специалистов вызывают датчики вибрационных ускорений (ДВУ) (акселерометры) из класса электромагнитных преобразователей, использующих инерцию твердотельных элементов и предназначенных для измерения низкочастотных динамических процессов [18]. Следует отметить, что подобные механические системы с упругим подвесом инерционного элемента, отличающиеся простотой конструкции и обеспечивающие приемлемую точность, в настоящее время нашли самое широкое применение.

В качестве примера рассмотрим три варианта конструкции типичных электромагнитных параметрических датчиков, которые ориентированы на регистрацию виброускорения [19, 20]. В первом варианте (рис. 2, а) датчик относится к индукционному типу и представляет собой преобразователь с инерционным элементом в виде индукционной измерительной катушки 5, подвешенной на упругих мембранных подвесах 6, которые служат одновременно токоподводами. Магнитопровод датчика образован цилиндрическим корпусом 1, центральным сердечником 2 и крышками 3. Катушка возбуждения 4 содержит две секции, соединенные последовательно и встречно.

Во втором варианте датчик фактически является функциональным трансформаторным преобразователем с инерционным элементом в виде подвижного металлического короткозамкнутого витка (тонкостенный цилиндрический экран) (рис. 2, б).

Магнитная система такого датчика содержит ферромагнитные коаксиальные цилиндрические сердечники 2 и 5, корпус 11. Ферромагнитная перемычка 1 соединяет сердечник 5 и корпус 11. Сердечники 2 являются конструктивной частью крышек 6, которые име-

ют возможность перемещаться относительно корпуса 11. Секции катушки возбуждения 7 располагаются между сердечником 5 и корпусом 11 по обе стороны относительно перемычки 1. Измерительная катушка 8 размещена вдоль рабочего воздушного зазора, образованного сердечниками 2 и 5. Проводящий экран 9 укреплен на втулке 10 и с помощью немагнитного штока 4 жестко связан с плоскими упругими подвесами 3. Фланцы 12 обеспечивают герметизацию внутренней полости датчика.

Магнитная система обеих конструкций является регулируемой. Вращением крышек относительно корпуса достигается ее симметрирование, вследствие чего значительно снижается уровень квадратурной составляющей сигнала на выходе измерительной обмотки в «нулевом» положении подвижной части ДВУ. В качестве упругих подвесов в рассматриваемых конструкциях ДВУ применены плоские мембраны из бериллиевой бронзы или пружинной стали. Изменением жесткости упругих подвесов можно в значительных пределах изменять верхнюю границу диапазона измеряемых ускорений.

В третьем варианте датчик, представленный в виде параметрического соленоидного преобразователя с профилированным плунжером, относится к индуктивному типу, который широко используется в вибродиагностике. Упрощенная конструктивная компоновка этого датчика приведена на рис. 3, где 1 – конический симметричный якорь-плунжер, являющийся инерционным элементом; 2' и 2'' – кожухи-экраны, охватывающие якорь-плунжер 1; 3' и 3'' – измерительные катушки.

При среднем положении плунжера 1 относительно измерительных катушек 3' и 3'' величины зазоров между каждым экраном и плунжером одинаковы, а при смещении плунжера 1 вдоль его оси на величину x эти зазоры за счет конусности плунжера в одной катушке уменьшаются, а в другой при этом увеличиваются, что и вызывает в итоге появление на выходе измерительной мостовой схемы соответствующего напряжения $U(x)$. В рассматриваемом случае измерительные катушки включены в измерительную мостовую схему в качестве плечевых элементов в измерительную мостовую схему, на которую подается напряжение питания $U_{пит}$.

К недостаткам рассмотренных ДВУ следует отнести их невысокую чувствительность и низкую помехозащищенность, а также недостаточный уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам. Кроме того, наличие у первого и второго вариантов ДВУ двухсекционных катушек возбуждения существенно усложняет как конструкцию самих ДВУ, так и технологичность их изготовления, что существенно снижает надежность их функционирования в целом. Следует отметить, что для третьего варианта ДВУ наличие системы магнитопроводов с изменяющимся зазором формирует сложную конфигурацию рабочих магнитных потоков для каждой из измерительных катушек, а создающие эти магнитные потоки рабочие токи катушек порождают паразитную взаимоиндукцию между ними, что в целом заметно усложняет процесс дальнейшего корректного преобразования информационных сигналов с ДВУ.

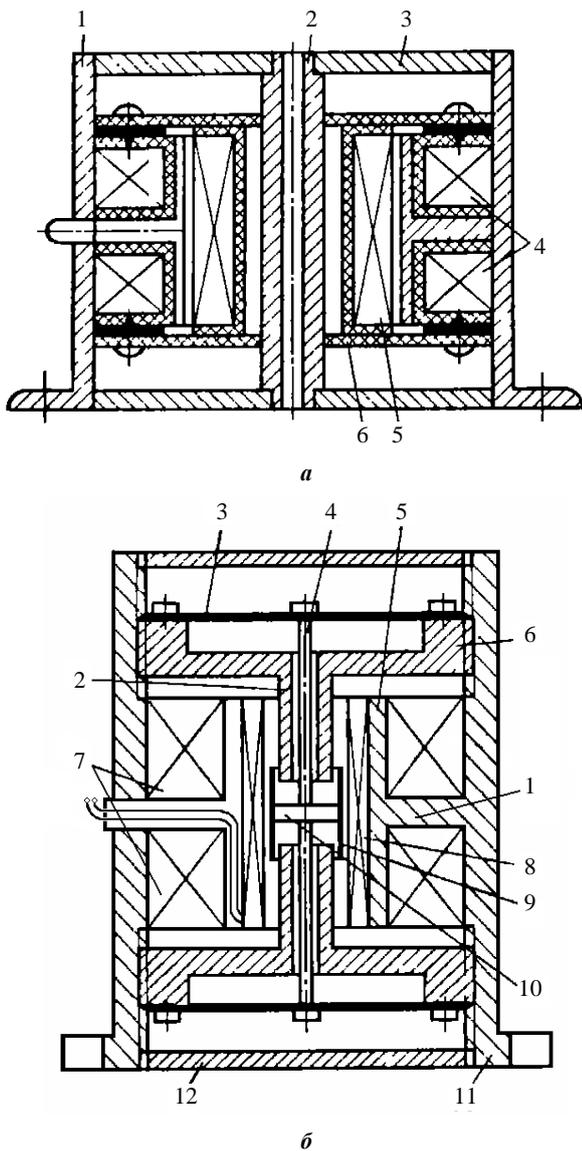


Рис. 2. Конструкция ДДУ:
а – с подвижной измерительной катушкой;
б – с подвижным короткозамкнутым витком

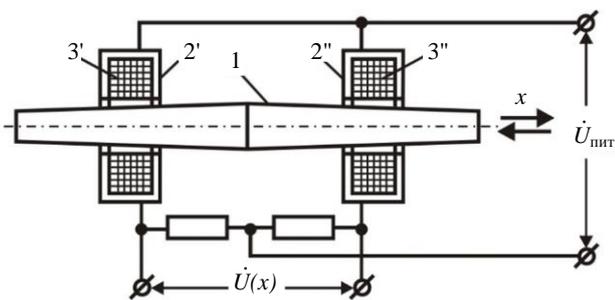


Рис. 3. Конструкция электромагнитного преобразователя индуктивного типа

ЭЛЕКТРОДНО-ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК ВИБРОУСКОРЕНИЯ

На основе проведенного всестороннего анализа рассмотренных ранее технических решений был предложен в качестве альтернативного варианта датчик виброускорения соленоидного типа, основанный на новом принципе действия. Конструкция этого датчика, отчасти напоминающая плунжерную соленоидную конструкцию, представлена на **рис. 4**.

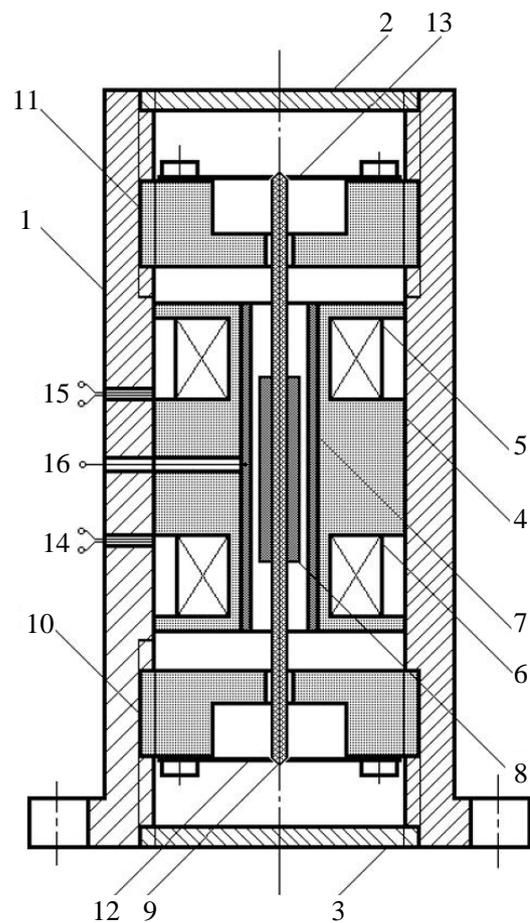


Рис. 4. Электродно-индуктивный датчик виброускорения

Все функциональные элементы датчика расположены внутри полости цилиндрического металлического корпуса 1 из немагнитного материала. Металлические фланцы 2 и 3, изготовленные также из немагнитного материала, обеспечивают герметизацию внутренней полости датчика. В свою очередь, измерительные катушки 5 и 6 размещены на диэлектрической фасонной цилиндрической втулке 4, на внутренней поверхности которой расположен медный электрод в виде тонкостенного цилиндра 7. Изготовленный из немагнитного материала шток 9, на котором находится немагнитная ферритовая цилиндрическая втулка 8, соответствующим образом сопряжен с плоскими упругими подвесами 12 и 13. Шток 9 и втулка 8 в своей совокупности образуют инерционную массу датчика. Коаксиальное расположение втулки 8 и цилиндрического электрода 6 обеспечивает необходимый гарантированный воздушный зазор между ними.

При этом плоские упругие подвесы 12 и 13 в совокупности с профильными диэлектрическими крышками 10 и 11, имеющими возможность линейного осевого перемещения относительно корпуса 1, образуют регулируемую систему подвеса инерционной массы датчика. Посредством профильных диэлектрических крышек 10 и 11 при настройке датчика обеспечивают начальное «нейтральное» пространственное положение этой инерционной массы. Сама конструкция датчика отчасти напоминает упомянутую ранее плунжерную соленоидную конструкцию. Клеммы 14 и 15

предназначены для подключения измерительных катушек 6 и 7 к соответствующим измерительным преобразователям информационных сигналов. Посредством клеммы 16 осуществляется подача напряжения питания на электрод 7.

Для более полного понимания принципа работы предлагаемого датчика рассмотрим подробно основные физические процессы, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения.

Основные необходимые для проведения такого анализа конструктивные параметры датчика приведены на рис. 5, на котором приняты следующие обозначения: D_n и $D_{вн}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры катушки; d – средний диаметр катушки; h – толщина сечения катушки; l_k – высота намотки катушки; $l_{сер}$ – длина сердечника (якоря); $l_{сер}/n$ – длина части сердечника, находящегося внутри катушки, n – долевая часть сердечника внутри катушки.

Принципиальная электрическая схема замещения и схема включения датчика представлены на рис. 6.

Здесь введены следующие условные обозначения: \dot{U}_0 – комплексная величина гармонического напряжения питания измерительных катушек; ФС – ферритовый сердечник (якорь-плунжер), являющийся инерционным элементом датчика и на который воздействует виброускорение g ; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; $C'_{св}$ и $C''_{св}$ – конденсаторы связи измерительных катушек с напряжением питания \dot{U}_0 соответственно для первой и второй измерительных катушек; ЭЦ₁ и ЭЦ₂ – соответственно первая и вторая параллельные электрические цепи мостовой схемы.

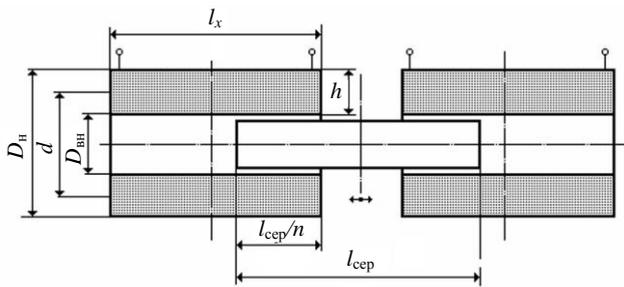


Рис. 5. Основные конструктивные параметры ДДУ

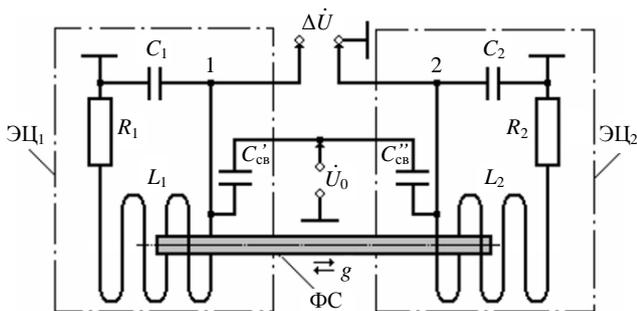


Рис. 6. Электрическая схема замещения и схема включения ДДУ

Следует отметить, что $C'_{св}$ и $C''_{св}$ конструктивно условно являются конденсаторами с паразитными емкостями, которые образованы медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенным ФС и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек.

Из рис. 6 видно, что на обмотки измерительных катушек, фактически включенных в измерительную мостовую схему, через соответствующую диагональ этой мостовой схемы подается напряжение питания $u_0 = U_{0max} \sin \omega t$ (соответствующее комплексное значение – \dot{U}_0). Особенностью данного варианта ДДУ является факт того, что в качестве сигнального выхода каждой измерительной катушки относительно «корпуса» используется соответствующее «начало» ее электрической обмотки, что является одним из основных условий успешного функционирования ДДУ в целом. Если считать «начало» электрической обмотки каждой измерительной катушки входным концом их электрических обмоток, то можно сказать, что выходной сигнал ДДУ снимается через измерительную диагональ мостовой схемы в виде напряжения $\Delta \dot{U}$, возникающего между этими входными концами электрических обмоток 1 и 2 соответственно первой и второй измерительных катушек.

Тогда в соответствии с вышесказанным для комплексного сопротивления первой параллельной электрической цепи мостовой схемы ЭЦ₁ можем записать:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_{1экр} + \dot{Z}_{13} = \frac{\dot{Z}_{11} \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12}} + \dot{Z}_{13}, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_{1экр}$ – импеданс первой измерительной катушки; $\dot{Z}_{13} = -j \cdot 1/(\omega \cdot C'_{св})$ – комплексное сопротивление конденсатора связи с напряжением питания \dot{U}_0 первой измерительной катушки; $\dot{Z}_{11} = R_1 + j\omega L_1$ – комплексное сопротивление первой измерительной катушки (последовательно соединенные R_1 и L_1); $\dot{Z}_{12} = -j \cdot 1/(\omega \cdot C_1)$ – комплексное сопротивление межвитковой емкости первой измерительной катушки.

Определим импеданс первой измерительной катушки:

$$\dot{Z}_{1экр} = \frac{\dot{Z}_{11} \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12}} = -\frac{j(R_1 + j\omega L_1)}{\omega R_1 C_1 + j\omega^2 L_1 C_1 - j}. \quad (2)$$

Для резонансного возбуждения измерительных катушек, т.е. $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_1 C_1}$, будем иметь

$$\dot{Z}_{1экр} = \frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{1}{\omega_p C_1}. \quad (3)$$

С учетом выражений (1) и (3) можем для импеданса первой измерительной катушки записать

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= -\frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{1}{\omega C_1} - j \frac{1}{\omega C'_{св}} = \\ &= \frac{L_1}{R_1 C_1} - j \frac{C'_{св} + C_1}{\omega_p C_1 C'_{св}} = \frac{\omega_p L_1 C'_{св} - j R_1 (C'_{св} + C_1)}{\omega_p C_1 C'_{св}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с (4) и на основании комплексной формы закона Ома для комплексного напряжения на первой измерительной катушке получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 - \dot{U}_{1cb} = \dot{U}_0 - \frac{\dot{U}_0}{Z_1} \dot{Z}_{13} = \\ &= \dot{U}_0 \left(1 + \frac{jC_1}{\omega_p L_1 C'_{cb} - jR_1 (C'_{cb} + C_1)} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

После соответствующих математических преобразований выражение (5) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \left[1 - \frac{R_1 C_1 (C'_{cb} + C_1)}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R_1^2 (C'_{cb} + C_1)^2} + \right. \\ &\left. + j \frac{\omega_p L_1 C_1 C'_{cb}}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R_1^2 (C'_{cb} + C_1)^2} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует заметить, что все приведенные математические выражения для первой параллельной электрической цепи ЭЦ₁ мостовой схемы будут справедливы и для второй параллельной электрической цепи ЭЦ₂ мостовой схемы. Поэтому, аналогично (6), для комплексного напряжения на второй измерительной катушке можем записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \left[1 - \frac{R_2 \cdot C_2 \cdot (C''_{cb} + C_2)}{\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R_2^2 \cdot (C''_{cb} + C_2)^2} + \right. \\ &\left. + j \cdot \frac{\omega_p \cdot L_2 \cdot C_2 \cdot C''_{cb}}{\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R_2^2 \cdot (C''_{cb} + C_2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для корректного функционирования датчика будем считать, что

$$R_1 = R_2 = R; C_1 = C_2 = C; C'_{cb} = C''_{cb} = C_{cb}. \quad (8)$$

В соответствии с (6), (7) и (8) для комплексного значения выходного напряжения $\Delta \dot{U}$ с измерительной диагонали мостовой схемы получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{-RC(C_{cb} + C)}{\omega_p^2 L_1^2 C_{cb}^2 + R^2 (C_{cb} + C)^2} + \\ &+ \frac{RC(C_{cb} + C)}{\omega_p^2 L_2^2 C_{cb}^2 + R^2 (C_{cb} + C)^2} + \\ &+ j \dot{U}_0 \left[\frac{\omega_p \cdot L_1 \cdot C \cdot C_{cb}}{[\omega_p^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{cb}^2 + R^2 \cdot (C_{cb} + C)^2]} - \right. \\ &\left. - \frac{\omega_p \cdot L_2 \cdot C \cdot C_{cb}}{[\omega_p^2 \cdot L_2^2 \cdot C_{cb}^2 + R^2 \cdot (C_{cb} + C)^2]} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем коэффициент отношения $K = C/C_{cb}$ и величину $Q = \omega L/R$, которая отображает добротность измерительной катушки. С учетом сделанных замечаний и после несложных математических преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \\ &= \frac{\omega_p^2 C C_{cb}^2 (C_{cb} + C)}{R^3 [Q_1^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2] [Q_2^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2]} \times \\ &\times (L_1^2 - L_2^2) + j \dot{U}_0 \frac{\omega_p C C_{cb}^3 [Q_1 Q_2 - (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2]}{R^2 C_{cb}^4 [Q_1^2 + (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2]} \times \\ &\times \frac{1}{Q_2^2 + (C_{cb} + C)^2 / C_{cb}^2} (L_2 - L_1) = \\ &= \frac{\omega_p^2 C C_{cb}^2 (C_{cb} + C)}{R^3 [Q_1^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2]} \times \\ &\times \frac{1}{Q_2^2 C_{cb}^2 + (C_{cb} + C)^2} (L_1^2 - L_2^2) + \\ &+ j \dot{U}_0 \frac{\omega_p K [Q_1 Q_2 - (1+K)^2]}{R^2 [Q_1^2 + (1+K)^2] [Q_2^2 + (1+K)^2]} (L_2 - L_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) можно также представить в более общем виде:

$$\Delta \dot{U} = \text{Re}(\Delta \dot{U}) + j \text{Im}(\Delta \dot{U}). \quad (11)$$

Из уравнения (10) следует, что информационный сигнал с выхода датчика имеет относительно сложную структуру, которая требует применения сложных алгоритмов его обработки. Для решения данной проблемы с учетом (11) предлагается использовать дополнительное преобразование информационного сигнала $U_{вх}(t)$ с вибродатчика в виде квадратурного детектирования посредством синхронного детектора (СД), являющегося линейным шестиполюсником, проводимость которого $\sigma(t)$ при помощи опорного напряжения переменного тока $U_{оп}(t)$ периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения $\omega_{оп}$ (рис. 7).

Иными словами, при подаче на измерительный вход СД измеряемого напряжения $U_{вх}(t)$ ток на его выходе будет определяться произведением измеряемого напряжения $U_{вх}(t)$ на проводимость $\sigma(t)$ СД, т.е.

$$i_{\text{ввых}}(t) = U_{\text{вх}}(t) \sigma(t),$$

где $\sigma(t) = \sigma_{\text{max}} \cdot \sin \omega_{оп} t$ – закон изменения проводимости СД во времени (вектор коммутации); σ_{max} – максимальное значение проводимости СД; $\omega_{оп}$ – циклическая частота опорного напряжения $U_{вх}$ СД.

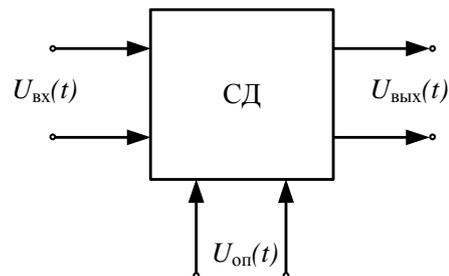


Рис. 7. Обобщенная схема СД в виде линейного шестиполюсника

При подаче на измерительный вход СД с вектором коммутации $\sigma(t) = \sigma_{\max} \cdot \sin \omega_{\text{оп}} t$ гармонического сигнала $U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх max}} \cdot \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi)$ на его выходе имеем

$$i_{\text{вых}}(t) = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi) \cdot \sin \omega_{\text{оп}} t = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos \varphi - \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos(2\omega t + \varphi). \quad (12)$$

В соответствии с (12) постоянная слагаемая выходного тока $I_{\text{Re,вых}}$ СД, определяемая активной составляющей входного измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}(t)$, будет определяться выражением

$$I_{\text{Re,вых}} = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \cos \varphi. \quad (13)$$

Тогда, аналогично (12) и (13), для постоянной составляющей выходного тока СД, определяемой реактивной составляющей входного измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}(t)$, имеем

$$I_{\text{Im,вых}} = \sigma_{\max} U_{\text{вх max}} \sin \varphi. \quad (14)$$

Применительно к рассматриваемому случаю, в соответствии с (13) и (14), векторы опорных напряжений синхронного детектора совмещаются на комплексной плоскости с соответствующими составляющими вектора питающего напряжения мостовой цепи \dot{U}_0 , а на выходах синхронного детектора получают синфазную и квадратурную составляющие выходного напряжения с измерительной диагонали мостовой схемы, для которых можно соответственно записать:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{Re}} &= S_{\text{Re}} \Delta \dot{U} \cdot \cos(\arg \Delta \dot{U}); \\ \Delta U_{\text{Im}} &= S_{\text{Im}} \Delta \dot{U} \cdot \sin(\arg \Delta \dot{U}), \end{aligned} \quad (15)$$

где S_{Re} и S_{Im} – коэффициенты преобразования соответственно синфазного и квадратурного детекторов.

Упрощенный вариант блок-схемы выделения мнимой составляющей (квадратурной) информационного сигнала с вибродатчика представлена на **рис. 8**, где 1 – вибродатчик; 2 – источник переменного напряжения питания \dot{U}_0 вибродатчика; 3 – фазовращатель, обеспечивающий сдвиг опорного напряжения СД $\dot{U}_{\text{оп}}$ относительно напряжения питания \dot{U}_0 на фазовый угол $\pi/2$; 4 – синхронный детектор.

Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что в процессе дальнейшей обработки информационного сигнала с датчика будет использоваться только его мнимая составляющая, которую согласно (10) и (11) можно представить в виде

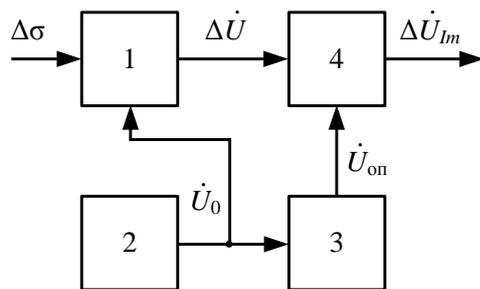


Рис. 8. Блок-схема выделения мнимой квадратурной составляющей

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= j \dot{U}_0 \frac{\omega_p K [Q_1 \cdot Q_2 - (1+K)^2]}{R^2 [Q_1^2 + (1+K)^2]} \times \\ &\times \frac{1}{[Q_2^2 + (1+K)^2]} (L_2 - L_1). \end{aligned} \quad (16)$$

Далее рассмотрим вопросы, связанные с таким параметром измерительных катушек, как их индуктивность.

Индуктивность первой и второй катушек можно представить соответственно в следующей формализации:

$$L_1 = L_0 + L_{1\text{сеп}}; \quad L_2 = L_0 + L_{2\text{сеп}}, \quad (17)$$

где $L_0 = w^2 d(d/p)^{0,5} \cdot 10^{-8}$ – индуктивность катушки при отсутствии сердечника; w – число витков катушки; d – средний диаметр катушки; p – периметр площади сечения катушки; h – толщина сечения катушки; $L_{1\text{сеп}}$ и $L_{2\text{сеп}}$ – приращения индуктивности соответственно первой и второй катушек при перемещении сердечника.

В свою очередь, для приращения индуктивности соответственно первой и второй катушек при перемещении сердечника справедливы выражения следующего вида [18]:

$$\begin{aligned} L_{1\text{сеп}} &= L_{\text{max}} e^{-m(\delta_{1\text{сеп}})^2} = L_{\text{max}} e^{-m(\delta_0 + \delta)^2}; \\ L_{2\text{сеп}} &= L_{\text{max}} e^{-m(\delta_{2\text{сеп}})^2} = L_{\text{max}} e^{-m(\delta_0 - \delta)^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $L_{\text{max}} = w^2 \cdot (h/D_{\text{вн}}) \cdot a \cdot \lambda_{\text{вн}}^{-b} \cdot \zeta \cdot (\mu_{\text{сеп}}/4 \cdot \pi)$ – максимальное приращение индуктивности при полном введении сердечника в катушку; $\mu_{\text{сеп}}$ – магнитная проницаемость сердечника; a и b – величины, зависящие от $\lambda_{\text{н}}$ и определяемые по соответствующей номограмме [21]; ζ – поправочный коэффициент проводимости, определяемый экспериментальным путем; $\delta_{1\text{сеп}}$ – величина перемещения сердечника первой катушки индуктивности; $\delta_{2\text{сеп}}$ – величина перемещения сердечника второй катушки индуктивности; δ_0 – исходная величина части сердечника, находящейся в катушке, т.е. при его нейтральном расположении ($L_1=L_2$); δ – величина перемещения сердечника относительно его нейтрального расположения; m – коэффициент, зависящий от соотношений $\lambda_{\text{н}}=l_{\text{к}}/D_{\text{н}}$ и $\lambda_{\text{вн}}=l_{\text{к}}/D_{\text{вн}}$ и определяемый по соответствующей номограмме [21].

В случае моногармонической вибрации перемещения сердечника для каждой из катушек индуктивности относительно его нейтрального расположения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \delta_{1\text{сеп}} &= \frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi); \\ \delta_{2\text{сеп}} &= \frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (19)$$

где $l_{\text{сеп}}/n$ – длина части сердечника, находящегося внутри катушки; $l_{\text{сеп}}$ – длина сердечника; n – долевая часть сердечника внутри катушки; $\delta_{\text{max}}/2$ – величина максимального перемещения сердечника относительно его нейтрального расположения; Ω – угловая частота перемещения сердечника.

С учетом (19) выражения (18) приводятся к виду

$$\begin{aligned} L_{1\text{сеп}} &= L_{\text{max}} \cdot e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2}; \\ L_{2\text{сеп}} &= L_{\text{max}} \cdot e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда для приращения индуктивности в результате периодического смещения сердечника ФС (см. рис. 5, 6) относительно его нейтрального расположения будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{сеп}} &= L_2 - L_1 = L_{1\text{сеп}} - L_{2\text{сеп}} = \\ &= L_{\text{max}} \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\} = \\ &= w^2 \frac{h}{D_{\text{вн}}} a \lambda_{\text{вн}}^{-b} \zeta \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4 \cdot \pi} \times \\ &\quad \times \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - \right. \\ &\quad \left. - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\}. \end{aligned} \quad (21)$$

Следует еще раз подчеркнуть, что нейтральное расположение сердечника ФС, имеющего упругий подвес и являющегося инерционным элементом датчика, состоящим из штока 9 и втулки 8, выставляется при подготовке датчика к работе при помощи профильных диэлектрических крышек 10 и 11, которые перемещают относительно корпуса 1 (см. рис. 4).

В соответствии с выражениями (13) и (18) можем записать

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \times \\ &\quad \times \frac{\omega_p K \left[Q_1 Q_2 - (1 + K)^2 \right]}{R^2 \left[Q_1^2 + (1 + K)^2 \right] \cdot \left[Q_2^2 + (1 + K)^2 \right]} \Delta L_{\text{сеп}} = \\ &= j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \times \\ &\quad \times \left\{ e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} \right\}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\Theta_3 = \frac{K \left[Q_1 Q_2 - (1 + K)^2 \right]}{R^2 \cdot \left[Q_1^2 + (1 + K)^2 \right] \cdot \left[Q_2^2 + (1 + K)^2 \right]}$ – коэффициент, отражающий взаимосвязи электрических

параметров катушек; $\Theta_{\kappa} = w^2 \cdot \frac{h}{D_{\text{вн}}} \cdot a \cdot \lambda_{\text{вн}}^{-b} \cdot \zeta$ – коэффициент, отражающий взаимосвязи конструктивных параметров катушек.

Исходя из того, что $e^z = 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots$ и пренебрегая степенными членами данного ряда, несложно трансформировать экспоненциальные члены выражения (22) к виду

$$\begin{aligned} &e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} - e^{-m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2} = \\ &= 1 - m \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} - \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2 - \\ &\quad - 1 + m \cdot \left[\frac{l_{\text{сеп}}}{2n} + \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) \right]^2 = \\ &= \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (23)$$

Принимая во внимание (23) и с учетом того, что $\dot{U}_0 = U_{0\text{max}} \cdot \cos \omega_p t + j \cdot U_{0\text{max}} \cdot \sin \omega_p t$, выражение (22) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= j S_{\text{Im}} \dot{U}_0 \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \cdot \sin(\Omega t + \varphi) = \\ &= -S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \sin(\Omega t + \varphi) \times \\ &\quad \times \sin \omega_p t + j S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{2} \times \\ &\quad \times \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \cos \omega_p t. \end{aligned} \quad (24)$$

Осуществим дополнительные преобразования тригонометрических функций в выражении (24):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{4} \times \\ &\quad \times \left\{ \left[-\cos(\Omega t - \omega_p t + \varphi) + \cos(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] + \right. \\ &\quad \left. + j \left[\sin(\Omega t - \omega_p t + \varphi) + \sin(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] \right\} = \\ &= S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \frac{\mu_{\text{сеп}}}{4\pi} \cdot \frac{l_{\text{сеп}}}{n} \cdot \frac{\delta_{\text{max}}}{4} \times \\ &\quad \times \left\{ -\left[\cos(\Omega t - \omega_p t + \varphi) - j \sin(\Omega t - \omega_p t + \varphi) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\cos(\Omega t + \omega_p t + \varphi) + j \sin(\Omega t + \omega_p t + \varphi) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (25)$$

Окончательный вариант выражения (25) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{Im}} &= \frac{1}{16\pi n} S_{\text{Im}} U_{0\text{max}} \Theta_3 \Theta_{\kappa} \omega_p \times \\ &\quad \times \mu_{\text{сеп}} l_{\text{сеп}} \delta_{\text{max}} \left[e^{j[(\Omega + \omega_p)t + \varphi]} - e^{j[2\pi + (\omega_p - \Omega)t - \varphi]} \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Полученное аналитическое выражение (26) отражает четко выраженную функциональную зависимость приращения квадратурной составляющей информационного сигнала с вибродатчика от величины перемещения ФС измерительной катушки, вызываемой внешними вибрациями:

$$\Delta \dot{U}_{lm} = S_{ик} \Delta \delta, \quad (27)$$

где $\Delta \delta = \delta_{max} [e^{j[(\Omega + \omega_p)t + \varphi]} - e^{j[2\pi + (\omega_p - \Omega)t - \varphi]}]$ – относительное перемещение корпуса вибродатчика и его инерционного элемента; $S_{ик}$ – коэффициент преобразования всего измерительного канала,

$$S_{ик} = \frac{1}{16\pi n} S_{lm} U_{0max} \Theta_{\varphi} \Theta_{\kappa} \omega_p \mu_{ср} l_{ср}.$$

Перейдем от уравнений с приращениями (27) к уравнению с пределами:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \dot{U}_{lm}}{\Delta t} = S_{ик} U_{0max} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta t}. \quad (28)$$

Полученному уравнению (28) соответствует выражение вида

$$\frac{d\dot{U}_{lm}}{dt} = S_{ик} U_{0max} \frac{d\delta}{dt}$$

или $\dot{U}_v = S_{ик} U_{0max} \frac{d\delta}{dt}. \quad (29)$

Таким образом, полученное выражение (29) фактически отражает связь между измеренным напряжением на выходе измерительного канала и относительной скоростью перемещения корпуса вибродатчика и его инерционного элемента.

Аналогичным образом определим аналитическое выражение, отражающее связь между напряжением на выходе измерительного канала и относительным ускорением перемещения корпуса вибродатчика и его инерционного элемента:

$$\dot{U}_a = \dot{U}'_v = S_{ик} U_{0max} \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (30)$$

Используя выражение (29), определим аналитическое выражение, отражающее связь между напряжением на выходе измерительного канала и относительным перемещением корпуса вибродатчика и его инерционного элемента:

$$\dot{U}_{\delta} = \int \dot{U}_v \cdot dt = S_{ик} U_{0max} \delta. \quad (31)$$

Известно, что для линейного вибродатчика дифференциальное уравнение, описывающее его работу имеет следующий вид [22]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\omega_0\beta \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2\delta = -g, \quad (32)$$

где g – ускорение перемещения корпуса вибродатчика в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{W/M}$ – собственная циклическая частота вибродатчика; W – жесткость упругих элементов; M – масса инерционного элемента; β – степень затухания.

В соответствии с (29) – (32) окончательно можем записать для значений измеряемого виброускорения выражение вида

$$\frac{1}{S_{ик}} \cdot \frac{\dot{U}_a}{U_{0max}} + \frac{2\omega_0\beta}{S_{ик}} \cdot \frac{\dot{U}_v}{U_{0max}} + \frac{\omega_0^2}{S_{ик}} \cdot \frac{\dot{U}_{\delta}}{U_{0max}} = -g$$

или

$$\frac{1}{S_{ик}} \cdot \frac{\dot{U}'_v}{U_{0max}} + \frac{2\omega_0\beta}{S_{ик}} \cdot \frac{\dot{U}_v}{U_{0max}} + \frac{\omega_0^2}{S_{ик}} \cdot \frac{1}{U_{0max}} \cdot \int \dot{U}_v \cdot dt = -g. \quad (33)$$

Анализ выражения (33) показал возможность нахождения значения регистрируемого виброускорения путем решения полученного дифференциального уравнения (33) с помощью аналоговых аппаратных средств. Три слагаемых левой части уравнения (33) формируются соответственно вибродатчиком (сигнал \dot{U}_v), дифференцирующим устройством (сигнал \dot{U}_a) и интегрирующим устройством (сигнал \dot{U}_{δ}), включенными на выходе вибродатчика.

Вариант аппаратного решения нахождения регистрируемого виброускорения в виде упрощенной блок-схемы представлен на рис. 9, где 1 – вибродатчик; 2 – дифференцирующее устройство; 3 – интегрирующее устройство; 4 – суммирующее устройство; S_v , S_a , S_{δ} и S_{Σ} – весовые коэффициенты для выходных сигналов соответственно с вибродатчика, дифференцирующего, интегрирующего и суммирующего устройств.

При использовании цифровых преобразователей и наличии ПК с соответствующим аппаратно-программным интерфейсом возможно решение дифференциального уравнения (33) путем реализации специальных вычислительных алгоритмов.

Следует отметить, что резонансный режим функционирования электрических цепей ЭЦ₁ и ЭЦ₂ мостовой схемы вибродатчика обеспечивает максимальное значение напряжений на измерительных катушках при минимальных значениях их рабочих токов, что в конечном счете и обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого варианта вибродатчика в целом.

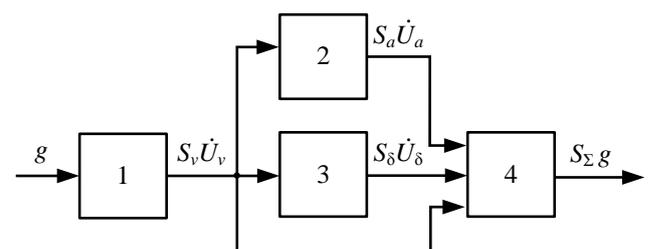


Рис. 9. Блок-схемы аппаратного решения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделим основные особенности, присущие предлагаемому варианту вибродатчика:

1. Информативным параметром датчика, на который воздействуют внешние механические колебания, является величина глубины введения якоря-плунжера в полость его измерительной катушки.

2. Сама конструкция вибродатчика выполнена таким образом, что ее функциональные элементы образуют полноценный четырехплечий измерительный мост, в котором в качестве вспомогательных плечевых элементов мостовой схемы измерения вместо резистивных элементов используются емкостные элементы, являющиеся составной частью конструкции самого датчика, что в целом обеспечивает высокий уровень инвариантности к дестабилизирующим факторам.

3. Используется резонансный режим возбуждения измерительных катушек, что обеспечивает достаточно высокую чувствительность датчика в целом.

4. Технологичность конструктивного исполнения датчика и достаточная надежность подсистемы обработки информационного сигнала с датчика, поскольку отсутствует катушка возбуждения, а в качестве элемента возбуждения использован общий для конструктивных емкостных элементов связи $C'_{св}$ и $C''_{св}$ цилиндрический электрод, образующий, в свою очередь, совместно с измерительными катушками электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью.

5. Отсутствие ферромагнитных контуров, намагниченных элементов конструкции, а также минимальные значения рабочих токов измерительных катушек и квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибродиагностика / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С., Веницкий М.Л., Неелов А.Н., Поросенков Ю.В., Таджибаев А.И. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 с.
2. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
3. Абрамов И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования. Кемерово: КузГТУ, 2011. 81 с.
4. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.

5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 125 с.
6. Manik D.N. Vibro-Acoustics: Fundamentals and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 487 p.
7. Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier, 2004. 255 p.
8. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. 168 с.
9. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
10. Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций / Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков // Научно-технический прогресс в машиностроении. М.: Междунар. центр науч. и техн. информ., ИМАШ им. А.А. Благодирова АН СССР, 1990. Вып. 25. 115 с.
11. Karimi H. Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
12. Landau I.D., Airimioaie T.B. Adaptive and Robust Active Vibration Control: Methodology and Tests. New York: Springer, 2017. 405 p.
13. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Неразрушающий контроль. Виброакустическая диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
14. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надёжность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
15. Чичков Б.А. Вибродатчики и микроэлектромеханические системы мобильных устройств, как их аналоги, для оценки вибросостояния роторных машин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 1. С. 120-125.
16. Опыт применения автоматизированных стационарных систем виброконтроля и вибродиагностики / Е.Н. Ишметьев, А.Н. Панов, А.В. Романенко, Е.Ю. Васильев, С.М. Коробейников // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 1(22). С. 56-59.
17. Беляев А.О. Интеллектуальный датчик виброскорости с аналоговым интегратором и цифровой коррекцией // Известия ЮФУ. 2008. № 2 (79). С. 130-135.
18. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
19. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
20. Цикерман Л.Я., Котляр Р.Ю. Индуктивные преобразователи для автоматизации контроля перемещений. М.: Машиностроение, 1966. 112 с.
21. Куликовский Л.Ф. Индуктивные измерители перемещений. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 280 с.
22. Бибер Л.А., Жданова Ю.Е. Низкочастотные маятниковые виброметры. М.: Энергия, 1980. 64 с.

Поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRODE INDUCTIVE VIBRATION SENSOR WITH CAPACITANCE COUPLING

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Head of the Information and Measuring System Laboratory, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, bivas2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Power Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Vadim R. Khramshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Head of Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, hvrmgn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

The analysis of vibroacoustic diagnostics systems was carried out. It was found that vibration acceleration sensors (accelerometers) from the class of electromagnetic transducers designed to measure low-frequency dynamic processes are of the greatest practical interest. A new version of a solenoid-type electrode inductive vibration acceleration sensor with an elastic suspension of an inertial element was proposed to measure low-frequency dynamic processes. A new vibration sensor design and its electrical equivalent circuit are presented as well as the operating principle of the vibration sensor. The sensor informative parameter, which is affected by external mechanical vibrations, is the insertion depth of the armature-plunger into the measuring coil cavity. To process the measurement information, a bridge circuit is used, and capacitive elements are used as auxiliary shoulder elements of this circuit, which are an integral design part of the sensor itself providing a high invariance level to destabilizing factors. In this case, the resonant excitation mode of the measuring coils is used, which ensures high sensitivity of the sensor as a whole. The analytical description of the main physical processes that determine the novelty of the considered technical solution was carried out. It is proposed to use an additional transformation of the information signal from the sensor in the form of quarter-phase detection by means of a synchronous detector.

Keywords: vibration sensor, measuring coil, inertial element, elastic suspension, turn-to-turn capacitance of the winding, coupling capacitors of measuring coils with supply voltage, bridge measuring circuit, resonance, quarter-phase detection.

REFERENCES

- Rosenberg G.Sh., Madorsky E.Z., Golub E.S., Vinickij M.L., Neelov A.N., Porosenkov Ju.V., Tadzhibaev A.I. *Vibrodiagnostika* [Vibration diagnostics]. Saint Petersburg, PEIPK Publ., 2003. 284 p. (In Russian)
- Adams M.L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
- Abramov I.L. *Vibrodiagnostika jenergeticheskogo oborudovaniya* [Vibration diagnostics of power equipment]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2011. 81 p. (In Russian)
- Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. Saint Petersburg, SPbGMTU Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
- Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Prakticheskie osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki mashinnogo oborudovaniya* [Practical fundamentals of vibroacoustic diagnostics of machinery]. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2002. 125 p. (In Russian)
- Manik D.N. *Vibro-Acoustics: Fundamentals and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 487 p.
- Girdhar P. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004. 255 p.
- Petrukhin V.V., Petrukhin S.V. *Osnovy vibrodiagnostiki i sredstva izmereniya vibracii* [Basics of vibration diagnostics and vibration measuring instruments]. Vologda, Infra-Engineering Publ., 2010. 168 p. (In Russian)
- Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin* [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring]. Omsk: Publishing house of OmSTU, 2011. 360 p. (In Russian)
- Balitskiy F.Ya., Genkin M.D., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. *Modern methods and means of vibration diagnostics of machines and configurations. Nauchno-tekhnicheskij progress v mashinostroenii* [Scientific and technological progress in mechanical engineering]. Moscow, MCNiTI, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering. Academy of Sciences of the USSR, 1990. 115 p. (In Russian)
- Karimi H. *Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems*. Academic Press, 2020. 398 p.
- Landau I.D., Airimioaie T.B. *Adaptive and Robust Active Vibration Control: Methodology and Tests*. New York, Springer, 2017. 405 p.
- Balitskiy F.Ya., Barkov A.V., Barkov N.A. *Nerazrushajushhij kontrol. Vibroakusticheskaja diagnostika* [Non-destructive testing. Vibroacoustic diagnostics]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
- Yurkevich V.V., Skhirtladze A.G. *Nadjozhnost i diagnostika tehnologicheskikh sistem* [Reliability and diagnostics of technological systems]. Moscow, Publishing Center "Academy", 2011. 304 p. (In Russian)
- Chichkov B.A. *Vibration sensors and microelectromechanical systems of mobile devices, as their analogues, for assessing the vibration state of rotary machines. Nauchnyj Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTU GA], 2016, vol. 19, no. 1, pp. 120-125. (In Russian)
- Ishmeteyev E.N., Panov A.N., Romanenko A.V., Vasiliev E.Yu., Korobeynikov S.M. *Experience of using automated stationary vibration control and vibration diagnostics systems. Elektrotehnicheskie sistemy i komplekisy* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, no. 1(22), pp. 56-59. (In Russian)
- Belyaev A.O. *Intelligent vibration velocity sensor with an analog integrator and digital correction. Izvestiya JuFU* [Izvestia SFedU], 2008, no. 2 (79), pp. 130-135. (In Russian)
- Fedotov A.V. *Teoriya i raschet induktivnykh datchikov peremeshhenij dlja sistem avtomaticheskogo kontrolja* [Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems]. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2011. 176 p. (In Russian)
- Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevsky M.L. *Elektromagnitnye datchiki mehanicheskikh velichin* [Electromagnetic sensors of mechanical quantities]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1987. 256 p. (In Russian)
- Tsikerman L.Ya., Kotlyar R.Yu. *Induktivnye preobrazovately dlja avtomatizacii kontrolja peremeshhenij* [Inductive transducers for automation of movement control]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1966. 112 p. (In Russian)

21. Kulikovskiy L.F. *Induktivnye izmeriteli peremeshhenij* [Inductive displacement meters]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 280 p. (In Russian)
22. Bieber L.A., Zhdanova Yu.E. *Nizkочастотные маятниковые вибrometry* [Low frequency pendulum vibrometers]. Moscow, Energy Publ., 1980. 64 p. (In Russian)
-

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Хравшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 39-49. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-39-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Electrode Inductive Vibration Sensor with Capacitance Coupling. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 39-49. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-39-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49)
