



ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.².

¹ Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук
Кыргызской республики, г. Бишкек, Кыргызстан

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas.2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Среди различных методов оценки технического состояния энергетического оборудования важное место занимает вибродиагностика. Поэтому улучшение качества аппаратного обеспечения проведения вибродиагностики имеет в настоящее время чрезвычайно важное значение. ЦЕЛЬ. Разработать вибродатчик с новым принципом действия для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования, а также теоретически обосновать работоспособность предложенного датчика. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялись основные положения теории вибродиагностики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана конструкция датчика виброускорения, особенность которой состоит в том, что его возбуждение осуществляется посредством конструктивных конденсаторов связи, первый электрод которых выполнен в виде металлического разрезного тонкостенного цилиндра, роль вторых электродов выполняет нижний ряд обмотки каждой измерительной катушки, а функцию инерционного элемента выполняет экран, выполненный в виде металлического кольца, закрепленного на подвесе в виде мембраны. На базе электрической схемы замещения датчика выполнено теоретическое обоснование его работоспособности и эффективности. Разработаны варианты схемотехнических решений первичного и вторичного измерительных преобразователей измерительного устройства для систем вибродиагностики. Первичный измерительный преобразователь содержит непосредственно датчик виброперемещений, источник синусоидального напряжения, входной дифференциальный измерительный усилитель и аналоговый фильтр, содержащий узкополосный фильтр, широкополосный усилитель и буферный усилитель. Вторичный измерительный преобразователь содержит квадратурный детектор информационных сигналов, выходной буферный усилитель и формирователь квадратурного опорного напряжения. Предложена также блок-схема аппаратного решения системы регистрации виброускорения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный датчик обладает улучшенными выходными показателями и может быть использован не только для виброконтроля энергетического оборудования, но и для измерения механических колебаний в системах технической диагностики различных других машин и механизмов, а также для задач спектральной сейсморазведки.

Ключевые слова: вибродиагностика; энергетическое оборудование; вибродатчик; токовихревое преобразование; конденсатор связи; измерительный мост.

Для цитирования: Брякин И.В., Бочкарев И.В. Измерительное устройство для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 137-152. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.

MEASURING DEVICE FOR SYSTEMS OF TECHNICAL VIBRO-DIAGNOSIS OF POWER EQUIPMENT

IV. Bryakin¹, IV. Bochkarev²

¹ Institute of Mechanical Engineering and Automation of the National Academy of Sciences

Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

² Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Summary: *RELEVANCE. Among the various methods for assessing the technical condition of power equipment, vibration diagnostics occupies an important place. Therefore, improving the quality of hardware for vibration diagnostics is currently extremely important. THE PURPOSE. To develop a vibration sensor with a new principle of operation for systems of technical vibration diagnostics of power equipment, as well as to theoretically substantiate the performance of the proposed sensor. METHODS. When solving the set goal, the main provisions of the theory of vibration diagnostics were applied. RESULTS. A design of the vibration acceleration sensor has been developed, the peculiarity of which is that it is excited by means of constructive coupling capacitors, the first electrode of which is made in the form of a thin-walled metal split cylinder, the role of the second electrodes is performed by the lower row of the winding of each measuring coil, and the function of the inertial element is performed by a screen made in the form of a metal ring fixed on a suspension in the form of a membrane. Based on the electrical equivalent circuit of the sensor, a theoretical substantiation of its operability and efficiency was made. Variants of circuit solutions for the primary and secondary measuring transducers of the measuring device for vibration diagnostics systems have been developed. The primary measuring transducer contains directly a vibration displacement sensor, a sinusoidal voltage source, an input differential measuring amplifier and an analog filter containing a narrow-band filter, a broadband amplifier and a buffer amplifier. The secondary measuring transducer contains a quadrature detector of information signals, an output buffer amplifier and a quadrature reference voltage driver. A block diagram of the hardware solution for the vibration acceleration registration system is also proposed. CONCLUSION. The developed sensor has improved output characteristics and can be used not only for vibration control of power equipment, but also for measuring mechanical vibrations in technical diagnostic systems of various other machines and mechanisms, as well as for tasks of spectral seismic exploration.*

Keywords: *vibrodiagnostics; power equipment; vibration sensor; eddy current conversion; coupling capacitor; measuring bridge.*

For citation: Bryakin IV, Bochkarev IV. Measuring device for systems of technical vibro-diagnosis of power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 137-152. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.

Введение

В системах производства и распределения электроэнергии используется огромное количество разнообразного оборудования. Для его эксплуатации и ремонта в соответствии с рекомендациями производителей требуется большое число квалифицированных специалистов и большие трудозатраты, что вызывает на практике значительные трудности. Более того, в настоящее время практически на всех электростанциях, а также подстанциях передачи и распределения электроэнергии широко используется изношенное силовое электротехническое и энергетическое оборудование, которое практически полностью выработало свой ресурс. Все это нередко приводит к выходу этого оборудования из строя, аварийным отключениям и связанными с этим перебоим в электроснабжении. Однако замена такого оборудования на новое затруднено вследствие отсутствия экономической возможности, а эффективность планово-предупредительного ремонта не высока и требует периодического вывода оборудования из эксплуатации. Поэтому очевидно, что в такой ситуации необходим постоянный контроль за состоянием оборудования [1, 2, 3], что позволит производить его ремонт не по фиксированным, заранее установленным срокам, а по его фактическому состоянию. Таким образом, одним из важнейших путей повышения надежности и эффективности использования энергетического оборудования является внедрение средств его диагностирования.

Методы и средства реализации

Известно много различных методов неразрушающего контроля для оценки наличия неисправностей энергетического оборудования, которые используются в различных системах мониторинга их состояния [4 - 8]. Применение конкретного метода определяется

поставленными задачами. При этом для работающего оборудования, особенно для вращающегося, которое генерирует вибрации, наиболее эффективным и универсальным методом неразрушающего контроля является вибрационный контроль [9 - 11]. Он обеспечивает не только наблюдение за оборудованием и выявление его дефектов и отказов, в том числе и еще до их возникновения, но и позволяет получить информацию о тенденциях изменения различных параметров во времени, что позволяет оценить потенциальные риски и предпринять своевременные действия для предотвращения выхода оборудования из строя. Это объясняется тем, что значительная часть дефектов и неисправностей деталей, узлов и их кинематических связей вызывает дополнительные механические колебания оборудования, причем каждый дефект вызывает специфический спектр вибрации, что и позволяет корректно и точно выявить данный конкретный дефект.

Очевидно, что виброакустический контроль позволяет без разборки и вывода из процесса работы оценить состояние энергетического оборудования по косвенным признакам, а именно, по отклонению виброакустических показателей, зависящих от состояния его деталей и узлов, а также характера их взаимодействия, от нормативных значений. На практике, если необходимо контролировать лишь величину вибрации без определения ее причины, используются системы вибромониторинга. Если же необходимо выявить причины возникновения вибрации, то применяют системы вибродиагностики. Виброакустическое диагностирование может быть использовано для любого оборудования, при работе которого возникают вибрация и колебаний. Следует отметить, что такая диагностика эффективна не только на стадии эксплуатации, но и в процессе производства отдельных деталей и узлов, а также для испытания оборудования при его изготовлении и после ремонта или модернизации.

Таким образом, применение систем технической вибродиагностики энергетического оборудования позволяет:

- обеспечить выявление неисправностей и предпосылок их возникновения, а также своевременно принимать меры по предотвращению развития неисправностей, предотвратив тем самым внезапный выход оборудования из строя;
- обеспечить значительный экономический эффект путем отказа от проведения контрольно-регламентных работ на исправном оборудовании;
- проводить целенаправленный ремонт или замену деталей и узлов с выявленными конкретными неисправностями, что обеспечит увеличение ресурса и надежности работы энергетического оборудования, а также повысит бесперебойность электроснабжения потребителей.

Как показывает статистика, периодическая вибродиагностика оборудования позволяет значительно (до 50%) сократить затраты на его обслуживание.

Следует отметить, что существует два принципа измерения вибрации: кинематический и динамический. При реализации кинематического принципа измеряют координаты точек объекта относительно выбранной неподвижной системы координат (измерение относительной вибрации), а при динамическом принципе параметры вибрации измеряют относительно искусственно созданной неподвижной системы отсчета, в большинстве случаев инерционного элемента, связанного с объектом через упругий подвес (измерение абсолютной вибрации). Кроме того, в зависимости от того, какую колебательную величину требуется измерять (виброперемещение, виброскорость или виброускорение), такие параметры колебательной системы, как масса инерционного элемента M , коэффициент демпфирования h , показатель затухания ε , относительное перемещение y корпуса датчика и инерционного элемента или частоту собственных колебаний системы ω_0 , должны удовлетворять определенным условиям. Например, если y пропорционально виброперемещению, то датчик работает в режиме виброметра, если y пропорционально виброскорости – то в режиме велосиметра, а если виброускорению – то в режиме акселерометра.

Вибрационный анализ позволяет выявить практически все неисправности, которые могут возникнуть в оборудовании. Для этого используют различные методы вибродиагностики механических узлов, описанные в [12 - 15].

Очевидно, что для получения диагностической информации о физических параметрах вибрации система контроля должна содержать соответствующий тип вибродатчика, эксплуатационные возможности и характеристики которого в значительной степени определяют эффективность виброакустического диагностирования в целом.

При виброакустическом диагностировании используются различные типы вибродатчиков, преобразующие механические колебания в электрический сигнал: пьезоэлектрические, индукционные, индуктивные, вихретоковые, емкостные,

пьезорезистивные и многие другие. При этом, в настоящее время широкое применение нашли лишь некоторые из них: индукционные (электродинамические) датчики, работающие в режиме виброметра и велосиметра; пьезоэлектрические датчики, работающие в режиме акселерометра; индуктивные и вихретоковые датчики, используемые для бесконтактного измерения относительных виброперемещений.

Конструктивно по виду движения чувствительного элемента вибродатчики (ВД) делятся на два класса: осевые и маятниковые. В ВД первого класса обеспечивается прямолинейное движение этого элемента, а в ВД второго класса – угловое. Как показал проведенный анализ технической литературы, наиболее перспективными являются ВД первого класса.

Особый интерес в вибродиагностике представляет низкочастотный диапазон измеряемых колебаний, которые характерны для виброперемещений, отражающих относительное смещение объекта или соответствующую деформацию. В этом случае наиболее эффективными являются вихретоковые датчики. Несмотря на то, что датчики такого типа известны уже давно, работы по их усовершенствованию и улучшению технико-экономических показателей проводятся в настоящее время весьма активно [16 - 21].

Все это показывает актуальность дальнейшего совершенствования вибродатчиков с улучшенными характеристиками и более широкими эксплуатационными возможностями для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования

Разработка датчика виброперемещения для систем технической вибродиагностики

В основе принципа построения предлагаемого варианта ВД лежит физический принцип функционирования вихретокового преобразователя, который характеризуется тем, что источником внешнего поля, взаимодействующего с полем катушки, являются вихревые токи, возбуждаемые переменным полем самой катушки в электромагнитных массах (в специальных экранах или контролируемых изделиях, обладающих электропроводностью). Выходным сигналом ВД является напряжение, амплитуда которого пропорциональна вибрационному ускорению. При необходимости, интегрируя этот сигнал, можно получить значение скорости и перемещения объекта.

Особенности конструктивного исполнения предлагаемого ВД представлены на рис. 1, где 1 и 2 – ферритовые броневые сердечники; 3 – резьбовой ферритовый стержень (ФС); 4 и 5 – измерительные катушки; 6 – диэлектрическая втулка в виде тонкостенного цилиндра; 7 – электрод активации (ЭА) в виде металлического разрезного тонкостенного цилиндра; 8 – экран в виде металлического кольца, выполняющего функции инерционного элемента; 9 – упругий подвес в виде плоской мембраны из бериллиевой бронзы.

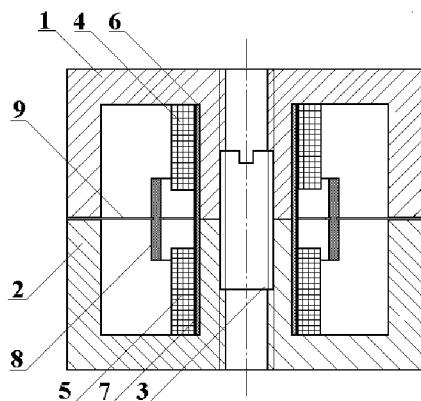


Рис. 1. Вариант конструкции вибродатчика

Fig. 1. Vibration sensor design option

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Конструктивные элементы 1, 2 и 3 в своей совокупности образуют разъемный магнитопровод ВД, на внутренней центральной части которого коаксиально соответственно располагаются измерительные катушки 4 и 5, диэлектрическая втулка 6 и электрод активации 7. При этом ферритовый резьбовой стержень 3, имеющий возможность микрометрических осевых перемещений относительно измерительных катушек 4 и 5, помимо центрирующей функции выполняет на стадии подготовки ВД к работе роль балансирующего элемента, влияющий на начальные параметры измерительных катушек 4 и 5. Инерционный элемент 8 в виде металлического экрана закреплен на упругом подвесе 9 и имеет возможность под действием вибраций совершать осевые перемещения относительно катушек 4 и 5.

Следует отметить, что упругий подвес 9 (рис. 2) выполнен в виде мембраны и является подвесом с направленным ходом инерционного элемента, где направляющие элементы являются частью самого подвеса. Упругий подвес жестко фиксируется на торцевой поверхности одного из броневых сердечников посредством трех установочных отверстий, что обеспечивает нейтральное пространственное положение экрана 8 относительно измерительных катушек 4 и 5.

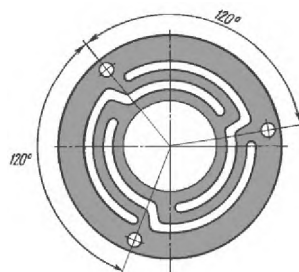


Рис. 2. Упругий подвес инерционного элемента Fig. 2. Elastic suspension of the inertial element

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Рассмотрим в самом общем виде работу предложенного варианта ВД, имеющего свои конструктивные особенности, которые заключаются в том, что нижний ряд обмотки каждой измерительной катушки выполняет роль второго электрода, который в совокупности с частью ЭА (первый электрод) образуют соответствующий конструктивный конденсатор связи для каждой измерительной катушки.

В этом случае переменный электрический потенциал φ_0 , подаваемый на ЭА от генератора возбуждения и изменяющийся по синусоидальному закону, индуцирует соответствующий переменный электрический потенциал φ_1^* и φ_2^* на витках нижнего ряда обмотки каждой измерительной катушки. Фактически к каждой электрической обмотке измерительной катушки прикладывается соответствующее гармоническое синусоидальное напряжение \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , определяемые следующими соотношениями:

$$\dot{U}_1 = \varphi_1^* - \varphi_K; \quad \dot{U}_2 = \varphi_2^* - \varphi_K,$$

где $\varphi_K = 0$ – условный электрический потенциал на корпусе ВД.

При этом в каждой из электрических обмоток измерительной катушки возникает соответствующий электрический переменный ток. Посредством этих электрических токов во внутреннем пространстве ВД, ограниченном ферритовыми броневыми сердечниками 1 и 2, создаются соответствующие переменные магнитные поля, наводящее в металлическом кольце (экране), выполняющего функции инерционного элемента, вихревые токи. Эти вихревые токи, в свою очередь, возбуждают вторичные (переизлученные) переменные магнитные поля, инициирующие процесс взаимной индукции между соответствующей измерительной катушкой и экраном Э.

При нейтральном пространственном положении экрана Э эти процессы являются равно подобными, т.е. выполняется теорема Кирпичева-Гухмана, определяющая следующие условия подобия: 1 – подобные процессы должны быть качественно одинаковыми, т.е. описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями и иметь одну физическую природу; 2 – условия однозначности подобных процессов должны быть одинаковыми, кроме численных значений постоянных, содержащихся в них; 3 – одноименные определяющие критерии подобных процессов должны иметь одинаковую численную величину.

В этом случае и с учетом того, что критерием подобия процессов взаимной индукции являются коэффициенты взаимной индукции между соответствующей измерительной катушкой и экраном, разница потенциалов между одноименными входными концами (они же информационные выходы) обмоток измерительных катушек будет равна нулю.

При осевом смещении экрана Э, вызванного вибрационными возмущениями, нарушается третье условие теоремы подобия процессов, что приводит к возникновению уже существенной разницы потенциалов между одноименными входными концами обмоток измерительных катушек. При этом характер смещения экрана Э 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.

Для анализа особенностей функционирования ВД рассмотрим его электрическую схему замещения, показанную на рисунке 3.

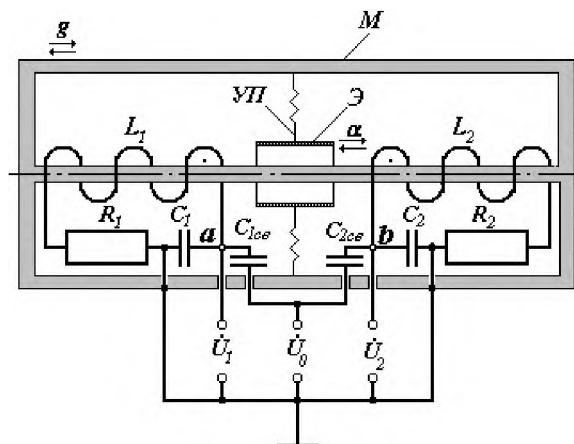


Рис. 3. Электрическая схема замещения ВД

Fig. 3. Electrical equivalent circuit of VD

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Здесь использованы следующие обозначения: УП – упругий подвес в виде мембраны; Э – металлический экран (инерционный элемент), на который воздействует виброускорение g ; M – магнитопровод ВД, образованный ферритовыми броневыми сердечниками; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК₁ и ИК₂); L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; \vec{U}_0 – комплексная величина гармонического напряжения питания, которое подводится к электроду активации; \vec{U}_1 и \vec{U}_2 – напряжения, снимаемые с одноименных концов обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_{1cv} и C_{2cv} – емкостные элементы связи измерительных катушек, через которые поступает напряжение питания \vec{U}_0 соответственно на ИК₁ и ИК₂.

Следует отметить, что C_{1cv} и C_{2cv} конструктивно условно являются конденсаторами с паразитными емкостями, которые образованы металлическим электродом активации 7 (рис. 1) с первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂ [20, 21]. Из рис. 3 следует, что ДВ фактически является одинарным индуктивно-емкостным мостом, представляющим собой четырехплечевую схему, у которой в плечах установлены емкостные (C_{1cv} и C_{2cv}) и индуктивные элементы (L_1 и L_2).

Обмотки ИК₁ и ИК₂ с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 фактически включены в измерительную мостовую схему, где через ее соответствующую диагональ подается напряжение питания $u_0 = U_{0max} \times \sin \omega t$ (комплексное значение \vec{U}_0 и циклическая частота возбуждения ω), а выходные сигналы регистрируются через электрические узлы «a» и «b» измерительной диагонали относительно корпуса в виде соответствующих напряжений \vec{U}_1 и \vec{U}_2 . В этом случае измеряемую величину можно определять по значению напряжения $\Delta \vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_2$ в измерительной диагонали моста, который по своей сути является неравновесным измерительным мостом.

Для существующей взаимосвязи между измерительной катушкой ИК₁ и экраном Э в соответствии со вторым законом Кирхгофа можем записать следующую систему аналитических выражений [22, 23]:

$$\begin{cases} \vec{U}_0 = \vec{I}_1^* \times \left(R_1 + j \times \omega \times L_1 - j \times \frac{1}{\omega \times C_{1cv}} \right) - j \times \omega \times M_1 \times \vec{I}_{1em}; \\ j \times \omega \times M_1 \times \vec{I}_1^* - (r_0 + j \times \omega \times L_0) \times \vec{I}_{1em} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{I}_1^* – комплексная величина тока в измерительной катушке ИК₁ при смещенном состоянии экрана Э относительно его нейтрального положения; \vec{I}_{1em} – комплексная величина вихревого тока, наводимого электромагнитным полем катушки ИК₁ в экране Э;

M_1 – коэффициент взаимной индукции между измерительной катушкой $ИК_1$ и экраном \mathcal{E} ;

$L_0 = \mu_0 \times \frac{d_0}{2} \times \left(\ln \frac{8}{l_0} \times \frac{d_0}{2} - \frac{1}{2} \right)$ и r_0 – индуктивность и активное сопротивление

элементарного витка (экрана \mathcal{E}); μ_0 – магнитная проницаемость материала элементарного витка; d_0 и l_0 – соответственно диаметр и длина элементарного витка; $C_{1cs} = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times 2\pi \times l_c / \ln(r^*/r)$ – электрическая емкость конденсатора связи измерительной катушки $ИК_1$, l_c – длина части цилиндрического электрода внутри измерительной катушкой $ИК_1$, r – условный радиус цилиндрического электрода, r^* – внутренний радиус измерительной катушки $ИК_1$.

Подставляя \dot{I}_{1em} , полученное из второго уравнения системы (1), в первое уравнение, получаем:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_1^* \times \left[R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 + j \times \left(\omega \times L_1 - \frac{1}{\omega \times C_{1cs}} - \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right) \right], \quad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 \times L^2}$ – модуль комплексного сопротивления экрана \mathcal{E} .

Исходя из того, что элементы мостовой измерительной в схемы в виде соответствующих индуктивно-емкостных плеч функционируют в режиме последовательного резонанса, т.е. $\omega \times L_1 = (\omega \times C_{1cs})^{-1}$ и $\omega \times L_2 = (\omega \times C_{2cs})^{-1}$, выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_1^* \times \left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 - j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right). \quad (3)$$

Учитывая, что в режиме последовательного резонанса $\dot{I}_1^* \rightarrow \max$, для напряжения на выводных концах $ИК_1$ справедлива запись вида:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_1^*} \times R_1 &= \frac{\dot{U}_0}{R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 - j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0} \times R_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot{U}_0 \times R_1 \times \frac{R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ &\rightarrow + \dot{U}_0 \times R_1 \times j \times \frac{\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

После несложных математических преобразований выражение (4) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{\dot{U}_0 \times R_1}{Z_0^2} \times \frac{R_1 \times Z_0^2 + \omega^2 \times M_1^2 \times r_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ &\rightarrow + \frac{\dot{U}_0 \times R_1}{Z_0^2} \times j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2 \times \omega \times L_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

В связи с тем, что значения $\omega^2 \times M_1^2$ незначительны, выражение (5) легко трансформируется к виду:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2 \times R_1} \times (r_0 + j \times \omega \times L_0) \quad (6)$$

В свою очередь, для существующей взаимосвязи между измерительной катушкой ИК₂ и экраном Э можем записать систему соответствующих аналитических выражений:

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \dot{I}_2^* \times \left(R_2 + j \times \omega \times L_2 - j \times \frac{1}{\omega \times C_{2св}} \right) - j \times \omega \times M_2 \times \dot{I}_{2em}; \\ j \times \omega \times M_2 \times \dot{I}_2^* - (r_0 + j \times \omega \times L_0) \times \dot{I}_{2em} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

где \dot{I}_2^* - комплексная величина тока в измерительной катушке ИК₂ при смещенном состоянии экрана Э относительно его нейтрального положения; \dot{I}_{2em} - комплексная величина вихревого тока, наводимого электромагнитным полем катушки ИК₂ в экране Э; M_2 - коэффициент взаимной индукции между измерительной катушкой ИК₂ и экраном Э.

Тогда, аналогично выражению (5) для напряжения на выводных концах ИК₂ можем записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_0 \times R_2}{Z_0^2} \times \frac{R_2 \times Z_0^2 + \omega^2 \times M_2^2 \times r_0}{\left(R_2 + \frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ \rightarrow + \frac{\dot{U}_0 \times R_2}{Z_0^2} \times j \times \frac{\omega^2 \times M_2^2 \times \omega \times L_0}{\left(R_2 + \frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Для окончательного варианта записи выражения (8) будем иметь:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2 \times R_2} \times (r_0 + j \times \omega \times L_0) \quad (9)$$

Разностное напряжение на измерительной диагонали измерительного моста с учетом (6) и (9) будет определяться выражением:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2}{Z_0^2 \times R} \times r_0 \times (M_1^2 - M_2^2) + j \times \frac{\dot{U}_0 \times \omega^3}{Z_0^2 \times R} \times L_0 \times (M_1^2 - M_2^2), \quad (10)$$

где $M_1^2 = k_1^2 \times L_1 \times L_0$; $M_2^2 = k_2^2 \times L_2 \times L_0$; k_1 и k_2 - коэффициенты связи между экраном Э и, соответственно, измерительной катушкой ИК₁ и измерительной катушкой ИК₂; $L_1 = L_2 = L = \mu \times w^2 \times l / S$; μ - магнитная проницаемость магнитопровода; w , l и S - соответственно количество витков, длина измерительных катушек и площадь их внутреннего сечения.

Обобщенный вариант конструкции ВД представлен на рисунке 4.

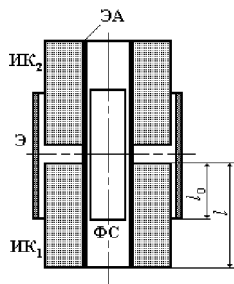


Рис. 4. Обобщенный вариант конструкции ВД

Fig. 4. Generalized version of the design of the VD

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Если учесть размерные параметры основных элементов ВД, то для рассматриваемого случая коэффициенты связи k_1 и k_2 являются функциями линейного перемещения δ экрана Э относительно своего нейтрального положения:

$$k_1 = k_0 \times (l - l_0 - \delta) = k_0 \times (l^* - \delta) \text{ и } k_2 = k_0 \times (l - l_0 + \delta) = k_0 \times (l^* + \delta), \quad (13)$$

где $l^* = (l - l_0)$ - часть длины измерительной катушки внутри экрана Э при его нейтральном положении, l_0 - часть длины измерительной катушки вне экрана Э при его нейтральном положении; k_0 - конструктивный коэффициент.

После соответствующих преобразований с учетом (11) выражение (12) трансформируется к следующему виду:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = -\frac{\dot{U}_0 \times \omega^2}{Z_0^2 \times R} \times r_0 \times k_0 \times L \times L_0 \times 4 \times I^* \times \delta - j \times \frac{\dot{U}_0 \times \omega^3}{Z_0^2 \times R} \times L \times L_0^2 \times k_0 \times 4 \times I^* \times \delta. \quad (14)$$

В обобщенном варианте уравнение (14) можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta \dot{U} = \text{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \text{Im}(\Delta \dot{U}). \quad (15)$$

Из анализа выражения (14) следует, что наиболее чувствительным компонентом $\Delta \dot{U}$ к измеряемому параметру δ является его мнимая составляющая $\text{Im}(\Delta \dot{U})$ (15). Поэтому для регистрации мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста необходимо использовать квадратурный детектор (КД) с опорным напряжением, сдвинутым по фазе на $\pi/2$ относительно фазы напряжения питания моста \dot{U}_0 .

Если при этом вектор опорного напряжения КД соответствующим образом совместить с осями координат на плоскости $\Delta \dot{U}$, то можно записать:

$$\Delta U_{Im} = |\Delta \dot{U}| \times \sin(\arg \Delta \dot{U}). \quad (16)$$

Функциональное уравнение для КД в общем случае можно представить в следующем виде:

$$u_{ВБХ}(t) = \Theta_{КД} \times u_{ВХ}(t) \times u_{ОП}(t), \quad (17)$$

где $u_{ВБХ}(t)$ – выходная величина КД; $u_{ВХ}(t)$ – измеряемая величина; $u_{ОП}(t)$ – вектор коммутации (периодическая величина); $\Theta_{КД}$ – постоянный коэффициент, определяемый параметрами КД.

Следует отметить, что опорный сигнал, создающий вектор коммутации, поступает от того же источника, что и измеряемый сигнал.

Воспользуемся релейным однополупериодным типом КД, у которого вектор коммутации определяется выражением вида:

$$u_{ОП}(t) = 0,5 \times U_{ОП_{max}} \times (1 + \text{sign} \sin \omega t) \quad (18)$$

Тогда, в соответствии с (17) и (18) можем для ΔU_{Im} записать выражение:

$$\Delta U_{Im} = -4 \times U_{0_{max}} \times U_{ОП} \times \Theta_{КД} \times \frac{Q \times Q_0}{(1 + Q_0)} \times L \times k_0 \times I^* \times \delta, \quad (19)$$

где $Q = \frac{\omega L}{R}$ – добротность измерительных катушек $ИК_1$ и $ИК_2$; $Q_0 = \frac{\omega L_0}{r_0}$ – добротность экрана Э.

После введения соответствующих определений и с учетом того, что в общем случае $\delta = F(t)$, выражение (19) можно представить в следующем виде:

$$\Delta U_{Im} = U_{вбх}(t) = -4 \times \Theta_{КД} \times \Theta_{КП} \times \Theta_{РФ} \times \delta(t), \quad (20)$$

где $\Theta_{КП} = 4 \times \frac{Q \times Q_0}{(1 + Q_0)} \times L \times k_0 \times I^*$ – постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами ДВ; $\Theta_{РФ} = 4 \times U_{0_{max}} \times U_{ОП}$ – постоянный коэффициент, определяемый параметрами режима функционирования ДВ.

Из уравнения (20) определяем искомый параметр $\delta(t)$:

$$\delta(t) = -0,25 \times U_{вбх}(t) \times (\Theta_{КД} \times \Theta_{КП} \times \Theta_{РФ})^{-1}. \quad (21)$$

Измерительное устройство (ИУ) для систем вибродиагностики, реализующее соотношение (21), функционально состоит из первичного измерительного преобразователя (ПИП) и вторичного измерительного преобразователя (ВИП) (рис. 5).

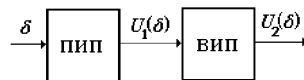


Рис. 5. Блок-схема измерительного устройства для систем вибродиагностики

Fig. 5. Block diagram of a measuring device for vibration diagnostic systems

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Вариант схемотехнического решения функционального модуля ПИП для данного измерительного устройства представлен рисункеб.

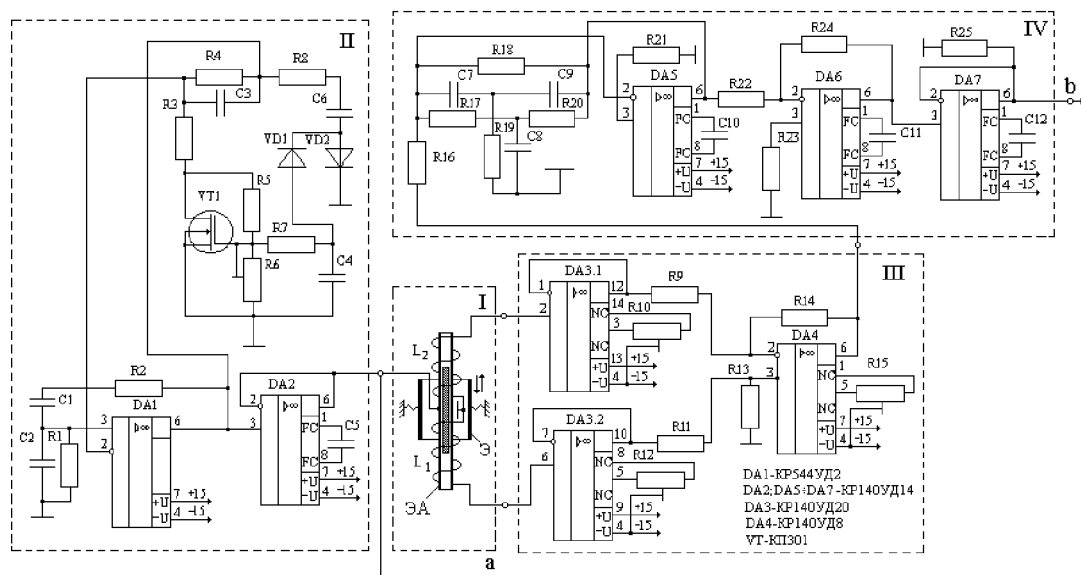


Рис.6. Схемотехническое решение первичного измерительного преобразователя

Fig. 6. Circuit design of the primary measuring transducer

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Здесь I – датчик виброперемещений; II – генератор синусоидального сигнала, собранного на DA1, DA2; III – входной дифференциальный измерительный усилитель, собранного на DA3, DA4; IV – аналогового фильтра, состоящего из узкополосного фильтра, выполненного на базе DA5, широкополосного усилителя DA6 и буферного усилителя DA7.

Источник синусоидального напряжения собран на основе ОУ DA1 по схеме RC-генератора с использованием моста Вина (C1, C2, R2, R3). Для получения гармонических колебаний с малыми искажениями используется инерционно-нелинейная цепь отрицательной обратной связи ОУ. Степень стабилизации амплитуды реализована на полевом транзисторе VT1, которым управляет постоянная составляющая, пропорциональная амплитуде выходного сигнала. С увеличением амплитуды уменьшается проводимость полевого транзистора, что приводит к уменьшению коэффициента усиления ОУ и, тем самым, к уменьшению амплитуды выходного сигнала. Установившееся значение амплитуды выходного сигнала равно 200 мВ, а его частота – 16 кГц. Погрешность стабилизации составляет менее 1%, а коэффициент гармоник не более 0,1%.

Синусоидальный сигнал через повторитель напряжения на ОУ DA2 поступает на электрод активации (ЭА) ВД. С выхода измерительного моста, плечевыми элементами которого являются согласно включенные электрические обмотки ИК₁ и ИК₂, имеющие среднюю точку соединения и соответственно индуктивности L_1 и L_2 , электрический сигнал, поступает на высокоомный вход дифференциального усилителя, собранного на ОУ DA3 и DA4.

Узкополосный активный фильтр собран на ОУ DA5 и частотно-избирательной RC цепи, выполненной в виде двойного Т-образного моста. Резонансная частота двойного Т-образного моста соответствует частоте синусоидального напряжения питающего RC-генератора и равна 12 кГц. Добротность моста составляет $Q=30$. Двойной Т-образный мост (C10÷C12, R21÷R24), включенный в обратную связь ОУ DA5, на частоте резонанса будет иметь сравнительно большое сопротивление, что обеспечивает в свою очередь ОУ наибольший коэффициент передачи. Данное схемное решение активного фильтра позволяет эффективно выделять информационный сигнал той же частоты, что и рабочая частота RC-генератора. Сигнал с выхода активного фильтра усиливается широкополосным усилителем DA6 с коэффициентом передачи $K=10$ и через буферный усилитель DA7 в виде сигнала «б» поступает на вход последующих электронных блоков.

На рис. 7 представлен вариант схемотехнического решения функционального модуля ВИП.

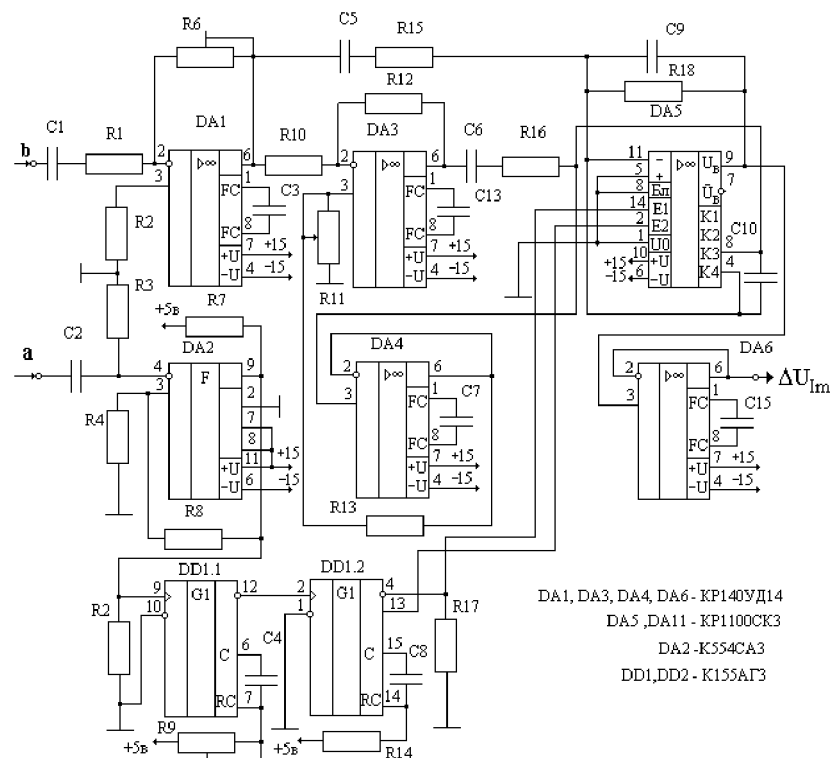


Рис. 7. Схемотехническое решение вторичного измерительного преобразователя

Fig. 7. Circuit design of the secondary measuring transducer

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

ВИП состоит из квадратурного детектора информационных сигналов, собранного на ОУ DA1, DA3, DA4, DA5; выходного буферного усилителя DA6; формирователя квадратурного опорного напряжения для КД, выполненного соответственно на компараторе DA2, и элементах DD1.1, DD1.2. Формирование исходного опорного напряжения в виде меандра для КД реализовано на компараторе DA2, путем соответствующего преобразования синусоидального сигнала «а» от генератора низковольтного высокочастотного синусоидального напряжения. Включение компаратора DA2 по приведенной схеме обеспечивает скорость нарастания выходного напряжения до 16 В/мкс, а порог срабатывания при этом составляет 3 мВ. Необходимая фаза квадратурного опорного напряжения задается фазовращателями, выполненными соответственно на одновибраторах DD1.1, DD2.2 путем регулировки сопротивлений R9.

Фазовращатель обеспечивает возможность регулировки фазы своего выходного сигнала (вида меандр) относительно входного от 0^0 до 180^0 . При этом формируются опорное напряжение необходимой фазы, которое и обеспечивают соответствующий релейный режим работы КД. В качестве детектора для КД используется специализированный ОУ DA5 со встроенными четырехканальными аналоговыми коммутаторами. Противофазно работающие последовательно-параллельные ключи этих коммутаторов позволяют работать КД с достаточно малыми сигналами, напряжение которых не превышает 0,5 В. КД обладает следующими техническими характеристиками: частотный диапазон 10 Гц ÷ 100 кГц; динамический диапазон 100 дБ; подавление некогерентного шума 70дБ; порог чувствительности 5 мкВ до 10 кГц и 20 мкВ до 100 кГц. Продетектированный информационный сигнал, являющийся квадратурной составляющей информационного сигнала через соответствующий выходной буферный усилитель DA6 в виде сигнала ΔU_{lm} поступает для дальнейшей обработки на вход информационно-вычислительного блока.

Следует отметить, что для линейного ВД уравнение динамического равновесия для его чувствительного элемента (экран) имеет следующий вид [24]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2 \times \delta = -g, \quad (22)$$

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

Подставляя выражение (21) в уравнение (22), получим:

$$g(t) = 0,25 \times (\Theta_{\kappa\Delta} \times \Theta_{\kappa\Pi} \times \Theta_{P\Phi})^{-1} \times \left[\frac{d^2 U_{\text{вбх}}(t)}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{dU_{\text{вбх}}(t)}{dt} + \omega_0^2 \times U_{\text{вбх}}(t) \right] \quad (23)$$

В обобщенном варианте это уравнение имеет следующий вид:

$$g(t) = 0,25 \times (\Theta_{\kappa\Delta} \times \Theta_{\kappa\Pi} \times \Theta_{P\Phi})^{-1} \times [\dot{U}_\delta + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \dot{U}_v + \omega_0^2 \times \dot{U}_\alpha], \quad (24)$$

где \dot{U}_δ – сигнал, пропорциональный относительному перемещению « δ » корпуса ВД и его инерциального элемента; \dot{U}_v и \dot{U}_α – сигналы, пропорциональные соответственно скорости « v » и ускорению « α » относительного перемещения корпуса ВД и его инерциального элемента.

Из анализа выражений (23) и (24) следует вывод о наличии возможности регистрации виброускорения путем решения полученного дифференциального уравнения с помощью аналоговых аппаратных средств. Три слагаемых правой части уравнения (24) формируются соответственно вибродатчиком (сигнал $U = \dot{U}_\delta$), первым дифференцирующим устройством (сигнал $U' = \dot{U}_v$) и вторым дифференцирующим устройством (сигнал $U'' = \dot{U}_\alpha$), последовательно включенными с вибродатчиком.

Вариант аппаратного решения системы технической вибродиагностики энергетического оборудования, позволяющей регистрировать виброускорение (ускорение перемещения корпуса ВД) в виде упрощенной блок-схемы представлен на рис. 8, где 1 – вибродатчик с измерительным каналом и коэффициентом преобразования S_δ ; 2 и 3 – дифференцирующие устройства с коэффициентами преобразования соответственно S_v и S_α ; 4 – суммирующее устройство; 5 – интегрирующее устройство с коэффициентом преобразования S [25]. На вход ВД (блок 1) поступает вибровозмущение в виде относительного перемещения δ корпуса ВД и инерционного элемента, которое преобразуется ВД в величину электрического напряжения $U = \delta \times S_\delta$. В свою очередь сигнал с блока 1 преобразуется блоком 2 в электрическое напряжение $U' = \delta' \times S_v$, которое в последующем преобразуется в напряжение $U'' = \delta'' \times S_\alpha$. После соответствующего суммирования указанных электрических сигналов блоком 4, преобразованный уже суммарный сигнал преобразуется блоком 5 в величину, соотнесенную к искомому параметру g , т.е. к ускорению перемещения корпуса ВД в абсолютной системе координат.

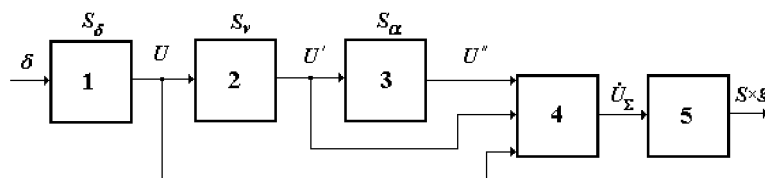


Рис. 8. Блок-схема аппаратного решения системы технической вибродиагностики энергетического оборудования

Fig. 8. Block diagram of the hardware solution for the system of technical vibration diagnostics of power equipment

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

С учетом сделанных замечаний уравнение (22) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{S} \times \int \left[\frac{1}{S_\alpha} \times U'' + \frac{2 \times \omega_0 \times \beta}{S_v} \times U' + \frac{\omega_0^2}{S_\delta} \times U \right] \times dt = -g. \quad (25)$$

Полученное уравнение отражает существующую возможность аппаратной реализации алгоритма определения ускорения перемещения корпуса ВД в абсолютной системе координат.

Заключение

Разработанный ВД обладает перед существующими аналогами следующими преимуществами:

1. повышенной чувствительностью, т.к. функционирует в режиме собственных последовательных резонансов измерительных катушек;

2. технологичностью и простотой конструкции, которые обеспечиваются отсутствием дополнительных внешних электронных элементов и использованием стандартных видов магнитопровода (ферромагнитные броневые сердечники);

3. повышенной надежностью функционирования, обусловленной высокой температурной и временной стабильностью рабочих характеристик за счет использования своих конструктивных особенностей в виде паразитной емкостной связи;

4. расширенными функциональными возможностями, которые легко реализуются, например, благодаря использованию инерционного элемента в виде замкнутого электропроводящего кольца и простой процедуры замены упругого подвеса в виде мембраны на торсионный подвес, позволяющей регистрировать уже и угловые перемещения.

5. сравнительно высокой точностью преобразования за счет повышенной помехозащищенности;

6. высокими потенциальными возможностями адаптации к различного рода техническим задачам и в случае необходимости к дальнейшей глубокой модернизации.

Совместное использование предлагаемого варианта ВД, микропроцессорных и цифровых технологий создаст необходимые условия для разработки в дальнейшем более совершенной виброакустической портативной системы, ориентированной на алгоритмическую обработку и детальный анализ полученной информации, что значительно повысит надежность оперативной оценки энергетического оборудования, в котором могут развиваться те или иные опасные процессы.

Кроме того, в связи с тем, что контролируемое оборудование работает рядом с другим работающими механическими устройствами, являющимися источниками вибрации, в контролируемом оборудовании возникают дополнительные внутренние механические напряжения, приводящие к появлению дополнительных шумовых полей звукового диапазона частот ($10 \div 10^4$ Гц). Поэтому возможно эффективное применение предлагаемого варианта ВД также для регистрации интенсивности и частотного спектра уже этих шумовых полей виброакустической эмиссии, что, в свою очередь, позволит получить ценную дополнительную информацию.

Следует отметить, что разработанный датчик с токовихревым преобразованием может быть использован не только для решения задач вибрационного контроля энергетического оборудования при его изготовлении, монтаже, наладке, ремонте или исследованиях, но и в качестве вибродатчика в системах технической диагностики любых других машин и механизмов, работа которых сопровождается возникновением механических колебаний и вибраций. Кроме того, он может использоваться также для задач спектральной сейсморазведки и задач инженерной геологии [26-29].

Литература

1. Басманов В.Г. Современные методы диагностики объектов электроэнергетики. Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. 136 с.
2. Белкин А.П., Степанов О.А. Диагностика теплоэнергетического оборудования. СПб.: Лань, 2018. 240 с.
3. Привалов Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. М.: Директ-Медиа, 2015. 229 с.
4. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. М.: ДМК, 2015. 298 с.
5. Васенин А.Б. Анализ методов диагностики и прогнозирования состояния ответственных энергетических установок // Химическая техника, 2018, № 8. С. 13-18.
6. Павленко С. В., Силин Н. В., Игнатъев Н. И. Применение прогрессивных методов диагностики высоковольтного энергетического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2018, Т. 8, № 1. С. 92-101.
7. Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Харрасов Б.Г., Ганиева И.И. Диагностика промышленного оборудования и локализация дефектов с использованием совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 83-92.
8. Куменко А. И., Токаев А. С. Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС: состояние и предложения по совершенствованию // Энергетик. 2020, № 10. С. 21-25.
9. Ступин О.А. Вибрационный метод диагностики, как современный способ неразрушающего контроля и выявления неисправностей технологических машин и оборудования // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. 2022. С. 103-109.

10. Daniel J. Inman. Vibration with Control. John Wiley & Sons Ltd, England. 2006. 388 p.
11. Митрофанов С.В., Сташкевич А.С. Вибродиагностика энергетического оборудования. Перспективы развития и оптимизация вибродиагностической технологии. Оренбург: ООО ИПК «Университет». 2013. С. 301 – 304.
12. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. 128 с.
13. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
14. Васильев В.А., Ницкий А.Ю., Ерпалов А.В., Белоусова С.А. МЭМС-технологии и вибродиагностика энергетического оборудования ТЭС // Электрические станции. 2019. № 4 (1053). С. 52-56.
15. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment. Diagnostic Systems For Energy Equipments Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 281. p. 1-22.
16. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 228-234.
17. Мелентьев В.В., Масленников Е.И., Порошин К.Г., Шибанов О.В. Научное датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID // Научные технологии в машиностроении, 2017. № 6 (72). С. 30-33.
18. Collette C., Matichard F. Vibration control of flexible structures using fusion of inertial sensors and hyper-stable actuator-sensor pairs. Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014). Belgium, 2014. pp. 1073-1084.
19. Xue X., Dong Y., Wu X. Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement // IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 735-744.
20. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 39-49.
21. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередач // Известия Вузов. Проблемы энергетики, 2022, Т. 24, № 4. – С. 63-76.
22. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля // Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
23. Faria J. A. B. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 420 p.
24. Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н., Тарасов Е.В. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: НПЦ Динамика, 2007. 286 с.
25. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Acoustic Emission Probe for Power Line Structure Diagnostic Systems // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022. pp. 108-113.
26. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
27. Collette C., Carmona-Fernandez P., Janssens S., Artoos K., Guinchard M., Hauviller C. Review of sensors for low frequency seismic vibration // ATS/Note/2011/001 (TECH) 2011. Pp. 1-21.
28. Брякин, И.В. Универсальный сейсморегистратор // Проблемы автоматизации и управления. – Бишкек: Илим. 2009. – №1. – С.111–120
29. Robein Etienne. Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations. EAGE Publications, Netherlands, 2010. 244 p.

Авторы публикации

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской республики, г. Бишкек, E-mail: bivas2006@vandex.ru.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек. E-mail: elmech@mail.ru.

References

1. Basmanov V.G. *Modern methods for diagnosing electric power facilities*. Kirov: FGBOU VPO «VyatGU», 2013. 136 p.
2. Belkin AP, Stepanov OA. *Diagnostics of heat power equipment*. St. Petersburg: Lan, 2018. 240 p.
3. Privalov EE. *Diagnostics of electric power equipment*. M.: Direct-Media, 2015. 229 p.
4. Mikheev G.M. *Digital diagnostics of high-voltage electrical equipment*. M.: DMK, 2015. 298 p.
5. Vasenin AB. Analysis of methods for diagnosing and predicting the state of critical power plants. *Chemical Engineering*, 2018;8:13-18.
6. Pavlenko SV, Silin NV, Ignatiev NI. Application of progressive methods for diagnosing high-voltage power equipment. *Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products*. 2018;8(1):92- 101.
7. Valeev AR, Tashbulatov RR, Kharrasov BG, et al. Diagnostics of industrial equipment and localization of defects using combined analysis of tensometric and vibration spectra. *Noise Theory and Practice*. 2021;7:2 (24):83-92.
8. Kumenko AI, Tokaev AS. Systems for monitoring and diagnosing the technical condition of turbine units at TPPs and NPPs: state and proposals for improvement. *Energetik*. 2020;10:21-25
9. Stupin OA. *Vibration diagnostic method as a modern method of non-destructive testing and troubleshooting of technological machines and equipment*. In the collection: Readings of Academician V. N. Boltinsky. 2022, pp. 103-109.
10. Daniel J. Inman. *Vibration control*. John Wiley & Sons Ltd, England. 2006. 388 rubles.
11. Mitrofanov SV, Stashkevich AS. *Vibrodiagnostics of power equipment. Development prospects and optimization of vibrodiagnostic technology*. Orenburg: LLC IPK «Universitet», 2013. P. 301 - 304.
12. Gavrilin AN, Moizes BB. *Diagnostics of technological systems*. Tomsk: Publishing House of TPU, 2014. 128 p.
13. Karimi H. (Ed.) *Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems*. Academic Press, 2020. 398 p.
14. Vasil'ev VA, Nitskii AYU, Erpalov AV, et al. MEMS-technologies and vibration diagnostics of power equipment of thermal power plants. *Elektricheskie stantsii*. 2019;4 (1053):52-56.
15. Babak VP, Babak SV, Myslovykh MV, et al. *Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment*. Diagnostic Systems For Energy Equipments Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 281. p. 1-22. doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_1.
16. Guo AA. Vibration Sensor Design Research. *Sensors & Transducers*. 2014;169(4):228-234.
17. Melentiev VV, Maslennikov EI, Poroshin KG, et al. *Science-intensive sensor for vibration diagnostics based on MEMS and RFID technology*. Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2017;6(72):30-33.
18. Collette C, Matichard F. *Vibration control of flexible structures using fusion of inertial sensors and hyper-stable actuator-sensor pairs*. Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014). Belgium, 2014, pp. 1073-1084.
19. Xue X, Dong Y, Wu X. *Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement*. IEEE Sensors Journal, 2020;20(2):735-744. doi: 10.1109/JSEN.2019.2943931.
20. Bryakin IV, Bochkarev IV, Khramshin VR. Electrode-inductive vibration sensor with capacitive coupling. *Electrotechnical systems and complexes*. 2021;4(53):39-49. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49.
21. Bryakin IV, Bochkarev IV. Vibration displacement sensor for monitoring systems of the state of structural elements of high-voltage power lines. *Izvestiya Vuzov. Problems of Energy*, 2022;24(4):63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.
22. Fedotov AV. *Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems*. Omsk: Publishing House of OmGTU, 2011. 176 p.
23. Faria JAB. *Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. 2008. 420 rubles.
24. Kostyukov VN, Naumenko AP, Boichenko SN, et al. *Fundamentals of vibroacoustic diagnostics of machine equipment*. Omsk: NPC Dynamics, 2007. 286 p.

25. Bryakin IV, Bochkarev IV, Khramshin VR. *Acoustic Emission Probe for Power Line Structure Diagnostic Systems*. 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022, pp. 108-113.
26. Boganik GN, Gurvich II. *Seismic exploration*. Tver: AIS Publishing House, 2006. 744 p.
27. Collette C, Carmona-Fernandez P, Janssens S, et al. *Review of sensors for low frequency seismic vibration*. ATS/Note/2011/001 (TECH) 2011. p. 1-21.
28. Bryakin IV. Universal seismic recorder. *Problems of automation and control*. Bishkek: Ilim, 2009;1:111-120.
29. Robein Etienne. *Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations*. EAGE Publications, Netherlands, 2010. 244 p.

Authors of the publication

Ivan V. Bryakin – Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan.

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan.

Шифр научной специальности:

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)

Получено

02.03.2023г.

Отредактировано

23.03.2023г.

Принято

24.03.2023г.