

## ДАТЧИК ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Брякин<sup>1</sup> И.В., Бочкарев<sup>2</sup> И.В.

<sup>1</sup> Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук  
Кыргызской республики, г. Бишкек, Кыргызстан

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
г. Бишкек, Кыргызстан

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

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

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Разработать дифференциальный параметрический индуктивный преобразователь значений вибрации в электрический сигнал, представляющий собой датчик виброперемещения (ДВ) с новым принципом действия. Теоретически обосновать работоспособность предложенного ДВ. Разработать новую систему виброакустического контроля технического состояния опор воздушных линий электропередач (ЛЭП) с использованием предложенного ДВ. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялась теория параметрических преобразователей и основные положения теории вибродиагностики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Конструктивной особенностью разработанного ДВ является отсутствие катушки возбуждения, причем его функциональные элементы образуют полноценный измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным коаксиально внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами проволоочных обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого датчика, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности. Полученный сигнал представляет собой функциональную зависимость выходного напряжения измерительного моста от величины внешних вибраций, характеристики временных реализаций которых отражают происходящие в опорах ЛЭП деградационные процессы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенная концепция системы мониторинга целостности опор ЛЭП фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, реализующей технологию PLC. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей опоры ЛЭП, вызванные естественными возмущающими факторами при их эксплуатации, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который составляет основу мониторинговой информации о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП.

**Ключевые слова.** Вибродиагностика, геотехническая система, датчик виброперемещения, измерительный мост, микровибрации, линия электропередач (ЛЭП), паразитные емкости, резонанс, система мониторинга состояния конструктивных элементов.

**Для цитирования:** Брякин И.В., Бочкарев И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередач // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.

## VIBRATION SENSOR FOR MONITORING SYSTEMS OF CONSTRUCTION ELEMENTS OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES

I.V. Bryakin<sup>1</sup>, I.V. Bochkarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mechanical Engineering and Automation of the National Academy of Sciences  
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

<sup>2</sup>Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan

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

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

**Summary:** *PURPOSE. To develop a differential parametric inductive transducer of vibration values into an electrical signal, which is a vibration displacement sensor (DV) with a new principle of operation. Theoretically substantiate the performance of the proposed DV. To develop a new system for vibroacoustic monitoring of the technical condition of overhead power transmission line (TL) supports using the proposed DV. METHODS. When solving this goal, the theory of parametric transducers and the main provisions of the theory of vibration diagnostics were used. RESULTS. The design feature of the developed DV is the absence of an excitation coil, and its functional elements form a full-fledged measuring bridge, the arms of which include interturn capacitances of the windings of the first and second measuring coils, as well as capacitances formed by a metal cylindrical electrode with a coaxially located inside it ferromagnetic rod and the first lower rows of wire windings of the measuring coils. The bridge circuit operates in a resonant mode, which ensures the high sensitivity of the proposed sensor, and the quadrature conversion of the information signal provides the necessary level of noise immunity. The received signal is a functional dependence of the output voltage of the measuring bridge on the magnitude of external vibrations, the characteristics of the temporary realizations of which reflect the degradation processes occurring in the power transmission line supports. CONCLUSION. The proposed system for monitoring the integrity of power transmission line supports is actually a distributed real-time sensor network that implements PLC technology. The DV of each sensor module registers microvibrations of the structural elements of the corresponding power transmission line support, caused by natural disturbing factors during their operation, and converts them into an electrical information signal, which forms the basis of monitoring information about the current state of the power transmission line support structural elements.*

**Keywords.** *Vibrodiagnostics, geotechnical system, vibration displacement sensor, measuring bridge, microvibrations, power line (TL), parasitic capacitances, resonance, system for monitoring the state of structural elements.*

**For citation:** I.V. Bryakin, I.V. Bochkarev. Vibration sensor for monitoring systems of construction elements of high-voltage power lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.

## Введение

Неотъемлемой частью энергетических систем являются опоры воздушных линий электропередач (ЛЭП), от выбора типа которых зависит долговечность и надежность конструкции самой ЛЭП, ее устойчивость к целому ряду внешних механических и природных факторов [1 - 3]. Поэтому, именно надежные опоры ЛЭП гарантируют безаварийную подачу электроэнергии потребителям, исключая перебои и возникновение внештатных, аварийных ситуаций. Следует отметить, что, несмотря на то, что отказы ЛЭП из-за разрушения опор составляют всего 13%, само разрушение опор имеет наиболее тяжелые последствия и приводит к большим затратам, связанным с восстановлением ЛЭП, и перерыву в электроснабжении [4, 5].

Наличие большого разброса прочности в таких материалах опор ЛЭП, как бетон, древесина и сталь, а также значительная изменчивость эксплуатационных нагрузок в виде собственного веса, крановой нагрузки, ветра и снега, действующих на элементы конструкции ЛЭП, часто приводит к технологическим разрушениям [6 - 9]. Так, например, при воздействии указанных факторов наиболее часто встречающимся дефектом является возникновение трещин, которые могут не влиять непосредственно на состояние опор ЛЭП в целом, но при этом свидетельствуют о серьезных конструкционных повреждениях, существенно снижающих долговечность и эксплуатационную безопасность опор ЛЭП. Причиной возникновения трещин служит обычно неправильное распределение нагрузки на несущие элементы конструкции опор ЛЭП, либо усадка фундамента, что в итоге и предопределяет необходимость развития методов диагностики эксплуатационного состояния оборудования ЛЭП. Главной и конечной целью такого диагностического обследования можно считать выявление оборудования, находящегося в предаварийном состоянии и оценка его технического ресурса. Это позволяет избежать надвигающихся

аварийных ситуаций, научно обосновать и минимизировать выбор необходимого и достаточного объема ремонтных мероприятий. При проведении подобных обследований объектами внимания становятся такие основные элементы ЛЭП, как провода и грозозащитные тросы, линейная арматура и изоляция, стойки опор, фундаменты и заземляющие устройства. Главными задачами при этом являются обнаружение элементов, снижающих надежность ЛЭП, установление причин возникновения дефектов, прогнозирование снижения ресурсов этих элементов ЛЭП [10-12].

В последние годы широкое распространение получили различные методы диагностики электрической части воздушных ЛЭП – проводов, контактных соединений и изоляции [13, 14]. Но для диагностики механической части ЛЭП – опор, стоек под оборудование и фундаментов, единственным широко распространенным способом остаются внешние осмотры, регламентируемые правилами эксплуатации электроустановок [15]. В большинстве случаев результаты подобных осмотров не могут считаться исчерпывающей диагностической информацией, так как наряду с видимыми дефектами конструкции зачастую имеют скрытые дефекты. Учитывая массовость этих элементов в составе любой электрической сети, можно констатировать, что вероятность возникновения аварий из-за повреждения механической части отдельных конструкций достаточно высока. Более того, следует подчеркнуть, что величина и распределение напряжений в опорах ЛЭП показывает не только механическую нагрузку непосредственно на опоры ЛЭП, но и косвенно характеризует нагрузку на провода [16]. Поэтому проблеме диагностики механической части ВЛ и ПС, находящихся в длительной эксплуатации, начали уделять более пристальное внимание [17-19]. Однако эти вопросы остаются актуальными как с точки зрения теории, так и практической реализации, и исследования, направленные на разработку новых систем контроля текущего состояния опор ЛЭП в настоящее время очень востребованы.

#### Материалы и методы

Рассмотрим ЛЭП в качестве технической системы (ТС), являющейся в свою очередь элементом геотехнической системы (ГТС). В общем случае структуру ГТС и взаимодействие ТС (инженерного сооружения в виде ЛЭП) с геологической средой и другими окружающими средами более детально можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 1.

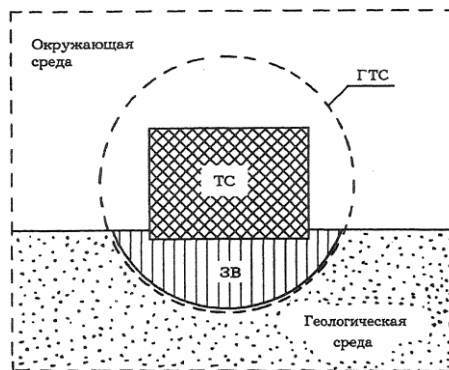


Рис. 1. Схема взаимодействия технической системы ТС с внешними средами.

Fig1. Scheme of interaction of a technical system with external environments

Как видно из рисунка 1, ГТС охватывает некоторое пространство, включающее собственно техническую систему (ТС) в виде ЛЭП, а также некоторые части окружающей и геологической сред в пределах, так называемой, зоны влияния (ЗВ) или зоны взаимодействия ТС и геологической среды. В результате действия различных экстремальных нагрузок на ТС со стороны геологической и окружающей сред, накопления повреждений, изменения с течением времени геометрии и тому подобных причин уменьшается способность данной механической системы сопротивляться внешним воздействиям. Следует отметить, что причинами отказов основных элементов ЛЭП в подавляющем числе случаев (в среднем до 70%) являются климатические и посторонние воздействия.

При возникновении нештатных ситуаций на первый план выходит проблема живучести такой ТС, т.е. ее способность оказывать сопротивление внешним воздействиям при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению ее геометрии. При этом системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом

ограниченную работоспособность, а системы с малой живучестью разрушаются катастрофически, что зачастую сопровождается большим материальным ущербом и гибелью людей.

Для предотвращения в подобных случаях катастрофических явлений необходимо принимать во внимание следующие основные факторы: 1 – любая деформация зарождается и развивается до критического состояния за определенное время; 2 – использование на различных инженерных сооружениях соответствующих систем мониторинга для контроля их основных параметров, а также поведения силовых (несущих) элементов под нагрузкой обеспечит необходимый уровень эксплуатационной надежности и безопасности.

В настоящее время существует множество методов и технологий неразрушающего контроля (НК), которые можно использовать для контроля состояния различных конструктивных элементов ЛЭП [20–22]. Одной из наиболее достоверных и информативных оценок является количественная оценка надежности элементов ЛЭП, полученная с помощью вибродиагностики, основанной на приеме и анализе виброакустических сигналов, которые представляют собой собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах, например, вибрационных, и акустическом шуме контролируемого объекта в окружающей среде.

Подобная виброакустическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП относится к классу систем функционального диагностирования, не требующих подачи на объект каких-либо целенаправленных сторонних воздействий. Иными словами, виброакустическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП работает в процессе применения объекта по назначению, при котором на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его эксплуатационными режимами функционирования в окружающей и геологической средах.

Для рассматриваемого случая рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП (металлические опоры ЛЭП и высоковольтные провода), возникающие при воздействии естественных возмущающих факторов в виде фоновых колебаний почвы под основанием опор ЛЭП и ветровых потоков. В результате такого воздействия во внутренних структурах указанных элементов ЛЭП возникают соответствующие случайные микровибрации, как результат возбуждения всех форм собственных колебаний ТС в целом.

Следует отметить, что вибрационное состояние ЛЭП определяется совокупностью его вибрационных характеристик и является следствием структурного и функционального состояний и динамических свойств его основных конструктивных элементов.

В качестве диагностических признаков могут быть использованы различные характеристики колебательных процессов: частота и амплитуда спектрального компонента, компонент кепстра, модуляционные характеристики, характеристики временных реализаций вибрации и ряд других.

#### Разработка датчика виброперемещения

Известно, что любая система НК предполагает наличие первичных измерительных преобразователей неэлектрической величины в электрический сигнал в виде соответствующих датчиков. На основе проведенного анализа научно-практической и патентной документации по известным техническим системам, применимым к диагностике опор ЛЭП, был сделан вывод о том, что наиболее приемлемыми являются системы НК, построенные на базе датчика виброперемещения (ДВ) из класса электромагнитных преобразователей, использующих инерцию твердотельных элементов и предназначенных для измерения низкочастотных динамических процессов [23–26]. К преимуществам подобных электродинамических вибродатчиков следует отнести широкий амплитудный диапазон, низкое выходное сопротивление и возможность передачи сигналов по длинной линии связи. Наряду с этим, известные ДВ имеют ряд недостатков, основными из которых являются невысокая чувствительность, а также недостаточная помехозащищенность.

Вариант блок-схемы измерительной цепи электродинамического осевого вибродатчика представлена на рис. 2.

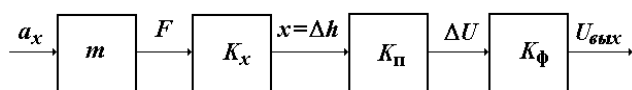


Рис. 2 Блок-схема измерительной цепи электродинамического вибродатчика

Fig. 2 Block diagram of the measuring circuit of the electrodynamic vibration sensor

Здесь обозначено:  $a_x$  – измеряемое ускорение;  $m$  – величина инерционной массы чувствительного элемента, являющейся коэффициентом передачи первого звена;  $F$  – сила инерции;  $K_x$  – коэффициент передачи второго звена;  $x$  – перемещение инерционной массы;  $K_{\text{Д}}$  – коэффициент передачи преобразователя перемещений;  $\Delta U$  – выходное напряжение преобразователя перемещения;  $K_{\Phi}$  – коэффициент передачи активного фильтра;  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение ДВ.

Для рассматриваемого варианта вибродиагностики предлагается использовать дифференциальный параметрический индуктивный преобразователь значений вибрации в электрический сигнал, т.е. ДВ соленоидного типа, в основе работы которого заложен новый принцип действия [27, 28]. На рисунке 3 показана конструкция этого датчика, которая в целом соответствует соленоидным плунжерным системам, ориентированным на измерения параметров вибрации в частотном диапазоне 1 Гц÷2 кГц. ДВ имеет цилиндрический корпус 1, закрытый с обеих сторон фланцами 2 и 3. Эти элементы изготовлены из металлического немагнитного материала и обеспечивают герметичность внутренней полости датчика. Фасонная втулка 4, выполненная из диэлектрического материала, на внешней поверхности имеет пазы для размещения цилиндрических измерительных катушек 5 и 6, а на ее внутренней поверхности установлен медный тонкостенный цилиндр 7. Инерционная масса датчика образована цилиндрической ферритовой втулкой 8, расположенной на немагнитном штоке 9 коаксиально цилиндру 7, который установлен на упругих плоских подвесах 12 и 13. Ферритовая втулка 8 в совокупности с немагнитным штоком 9 образуют якорь-плунжер ДВ.

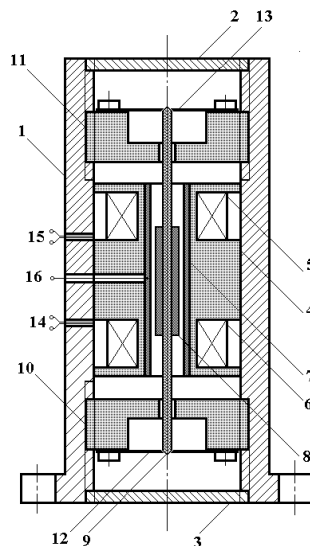


Рис. 3. Конструкция датчика *Fig. 3 Vibration sensor design*  
виброперемещения

Указанные упругие подвесы жестко закреплены на диэлектрических фасонных шайбах 10 и 11, которые установлены с возможностью осевых перемещений относительно корпуса 1. На стадии подготовки датчика к работе путем смещения шайб 10 и 11 устанавливают нейтральное пространственное положение ферритовой втулки 8 относительно измерительных катушек 5 и 6.

**Теоретическое обоснование работоспособности предложенного ДВ.** Рассмотрим основные особенности функционирования предложенного ДВ.

В связи с тем, что рассматриваемый ДВ относится к классу параметрических преобразователей, одним из основных вопросов, требующего более внимательной проработки, является выбор и обоснование способа включения ДВ в измерительную схему. Конструктивные особенности рассматриваемого варианта ДВ предполагают включения ДВ в измерительную мостовую схему.

Известно, что в зависимости от характера решаемых измерительных задач различают три способа включения измерительных преобразователей в мостовую схему: 1 – мост с преобразователем, включенным в одно плечо моста; 2 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в противоположные плечи; 3 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в два соседних плеча моста.

В связи с тем, что рассматриваемый ДВ фактически представляет собой преобразователь дифференциального типа, то наиболее предпочтительным для него

является третий способ включения, который позволит достичь наибольшей чувствительности мостовой схемы в сочетании с температурной компенсацией и с наименьшей нелинейностью функции преобразования, не превышающей 0,5%.

Исходя из вышеизложенного, предлагается вариант электрической схемы включения ДВ (рис. 4), где:  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>);  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; ЯП – якорь-плунжер, являющийся инерционным элементом датчика и на который воздействует виброускорение  $g$ ;  $\dot{U}_0$  – комплексная величина гармонического напряжения питания, которое подводится к среднему электроду трехэлектродного конденсатора связи  $C_{св}$ , образованного медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенным ЯП и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек;  $C'_{св}$  и  $C''_{св}$  – конденсаторы связи измерительных катушек, образованные частью среднего электрода трехэлектродного конденсатора связи  $C_{св}$  и самыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $C_1$  и  $C_2$  – межвитковые емкости обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек.

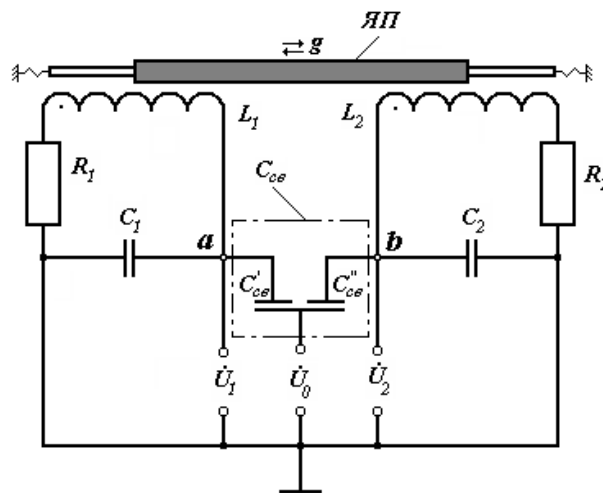


Рис.4. Электрическая схема включения ДВ

Fig. 4 The electrical circuit for switching on the vibration displacement sensor

Из рисунка 4 следует, что ДВ фактически является одинарным индуктивно-емкостным мостом, представляющим собой четырехплечевую схему, у которой в плечах установлены емкостные ( $C'_{св}$  и  $C''_{св}$ ) и индуктивные элементы  $L_1$  и  $L_2$ .

С учетом вышесказанного, для одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов  $C'_{св}$  и  $C''_{св}$  с заполненным диэлектриком межэлектродным пространством, электроды которых представлены в виде соответствующих двух коаксиальных цилиндров с осевой длиной  $l_c$  (м), условными радиусами  $r$  (м) и  $r^*$  (м) соответственно для внутреннего и внешнего электродов справедлива запись следующего вида:

$$C'_{св} = C''_{св} = C^* = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l_c}{\ln\left(\frac{r^*}{r}\right)}. \quad (1)$$

Следует отметить, что обмотки ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> с индуктивностями соответственно  $L_1$  и  $L_2$  фактически включены в измерительную мостовую схему, где через ее соответствующую диагональ подается напряжение питания  $u_0 = U_{0\max} \cdot \sin \omega t$  (комплексное значение  $\dot{U}_0$  и циклическая частота возбуждения  $\omega$ ), а выходные сигналы регистрируются через электрические узлы «a» и «b» измерительной диагонали относительно корпуса в виде соответствующих напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ . В этом случае измеряемую величину можно определять по значению напряжения  $\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$  в измерительной диагонали моста, который по своей сути является неравновесным измерительным мостом.

Кроме того, все конструктивные параметры обмотки ИК<sub>1</sub> идентичны всем конструктивным параметрам обмотки ИК<sub>2</sub> (рис. 5), т.е.  $w_1 = w_2 = w$ ,  $l_{1к} = l_{2к} = l_k$  и

$R_1=R_2=R^*$  – соответственно число витков, длина и активные сопротивления обмоток ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $X_{C'_{св}} = X_{C''_{св}} = X_{C^*} = (\omega \times C^*)^{-1}$  – значение реактивных сопротивлений одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов соответственно  $C'_{св}$  и  $C''_{св}$ .

В связи с тем, что при линейном осевом перемещении ЯП внутри ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> индуктивности последних  $L_1$  и  $L_2$  изменяются приблизительно пропорционально частям массы ЯП, находящихся внутри соответствующих измерительных катушек (рис.5), то для текущих значений этих индуктивностей можем записать:

$$\begin{aligned} L_1 &= \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 + \delta)}{l_k} = L_0 + \Delta L; \\ L_2 &= \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 - \delta)}{l_k} = L_0 - \Delta L, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $w$  и  $l_k$  – соответственно число витков и длина измерительных катушек,  $D_2$  и  $D_1$  – наружный и внутренний диаметры поперечного сечения измерительных катушек в сантиметрах;  $l_0$  – величина вхождения ЯП в сантиметрах;  $\delta$  – линейное осевое смещение ЯП под воздействием внешних возмущений;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала ферритовой втулки ЯП;  $L_0$  – индуктивности измерительных катушек при нейтральном положении ЯП;  $\Delta L$  – изменение индуктивностей под воздействием внешних возмущений.

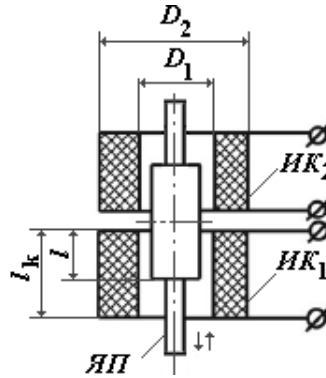


Рис. 5. Дифференциальный индуктивный датчик соленоидного типа Fig. 5 Solenoid type differential inductive sensor

Основное уравнение динамики ДВ с поступательным перемещением чувствительного элемента можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2 \times \delta = -a, \quad (3)$$

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

При нейтральном положении ЯП для реактивных сопротивлений ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> можем констатировать, что

$$L_1 = L_2 = L_0; \quad X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L_0}, \quad (4)$$

где  $X_{L_1} = \omega \times L_1$  и  $X_{L_2} = \omega \times L_2$  – текущие значения реактивных сопротивлений соответственно ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>;  $X_{L_0}$  – значение реактивных сопротивлений ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> при нейтральном положении ЯП, т.е. при сбалансированном состоянии мостовой схемы.

Таким образом, в режиме сбалансированного состояния, при котором  $X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L_0}$ , для индуктивно-емкостного моста на его измерительной диагонали будем иметь:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } \dot{U}_1 = \dot{U}_0 \times \frac{R_1 + j \times X_{L_1}}{R_1 + j \times (X_{L_1} - X_{C'_{св}})} + \dot{U}_{сш}; \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R_2 + j \times X_{L_2}}{R_2 + j \times (X_{L_2} - X_{C''_{св}})} + \dot{U}_{сш};$$

$\dot{U}_{сш}$  – комплексное значение аддитивных синфазных помех.

При внешнем воздействии на ЯП, вызывающем его линейное осевое смещение  $\delta$ , возникают и соответствующие изменения реактивных сопротивлений в виде  $\pm \Delta X_L$ .

Тогда, с учетом сделанных замечаний, для реактивных сопротивлений ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> можем записать:

$$\begin{aligned} X_{L_1} &= \omega \times L_1 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L_0} + \Delta X_L; \\ X_{L_2} &= \omega \times L_2 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L_0} - \Delta X_L. \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с выражениями (5) и (6) для регистрируемых напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{\text{СП}}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{\text{СП}}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом того, что питание индуктивно-емкостного моста осуществляется электрическим напряжением на циклической частоте последовательного резонанса  $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_0 \times C^*}$  двух симметричных пар его плечевых элементов  $L_1; C'_{\text{св}}$  и  $L_2; C''_{\text{св}}$ , можем считать:

$$X_{L_0} = X_{C^*}$$

Тогда выражения (7) легко трансформируются к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для регистрируемого напряжения на измерительной диагонали индуктивно-емкостного моста после несложных математических преобразований получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}} - \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} - \dot{U}_{\text{СП}} = \\ &= \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*) \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2} - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2 \times R^* \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

В связи с тем, что  $(R^*)^2 \gg (\Delta X_L)^2$  выражение (9) можно привести к виду:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*)}{(R^*)^2} \times \Delta X_L - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2}{R^*} \times \Delta X_L = \text{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \text{Im}(\Delta \dot{U}) \quad (10)$$

Для одновременной регистрации вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста требуется два квадратурных детектора (КД) с опорными напряжениями, сдвинутыми по фазе на  $\pi/2$ . Если векторы опорных напряжений совместить с осями координат на плоскости  $\Delta \dot{U}$ , то можно записать:

$$\Delta U_{\text{Re}} = |\Delta \dot{U}| \times \cos(\arg \Delta \dot{U}); \quad \Delta U_{\text{Im}} = |\Delta \dot{U}| \times \sin(\arg \Delta \dot{U}), \quad (11)$$

Из анализа полученного выражения (11) следует, что более определенную информацию, связанную с реакцией ЯП на внешнее возмущение, несет мнимая составляющая  $\Delta U_{\text{Im}}$ .

Для повышения точности измерения вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста предлагается использовать синхронное детектирование, при котором синхронный детектор (СД) является линейным шестиполусником. При этом проводимость такого линейного шестиполусника при помощи опорного напряжения переменного тока периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения.

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

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = S \times u_{\text{ВХ}}(t) \times u_{\text{ОП}}(t)$$



где  $u_{БВХ}(t)$  – выходная величина СД;  $u_{ВХ}(t)$  – измеряемая величина;  $u_{ОП}(t)$  – вектор коммутации (периодическая величина);  $S$  – постоянная, определяемая параметрами СД.

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

Воспользуемся гармоническим типом СД, у которого вектор коммутации определяется выражением вида:

$$u_{ОП}(t) = U_{ОП_{max}} \times \cos \omega_p t$$

Тогда, при подаче на измерительный вход такого гармонического СД с вектором коммутации  $u_{ОП}(t) = U_{ОП_{max}} \times \cos \omega_p t$  измеряемого синусоидального напряжения (с частотой, равной частоте вектора коммутации  $\omega_p$ )  $u_{ВХ}(t) = U_{ВХ_{max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi)$  на выходе СД получим соответствующий выходной сигнал:

$$u_{БВХ}(t) = S \times U_{ВХ_{max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi) \times U_{ОП_{max}} \times \cos \omega_p t$$

или

$$u_{БВХ}(t) = \frac{S \times U_{ВХ_{max}} \times U_{ОП_{max}}}{2} \times [\sin \varphi + \sin(2 \times \omega_p t + \varphi)] = u_{const} + u_{var} \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что при равенстве частот входного измеряемого сигнала и вектора коммутации выходной сигнал СД содержит постоянную слагаемую, пропорциональную реактивной компоненте вектора измеряемого сигнала:

$$u_{const} = \frac{S \times U_{ВХ_{max}} \times U_{ОП_{max}}}{2} \times \sin \varphi \quad (13)$$

При этом, переменная слагаемая  $u_{var}$  выходного сигнала СД подавляется соответствующим сглаживающим инерционным фильтром.

Из выражения (13) следует, что применение гармонического СД позволит не только определить соответствующую компоненту вектора измеряемого сигнала, но и полностью исключить влияние высших гармоник и помех, наложенных на измеряемое напряжение.

В случае моногармонической вибрации для линейного осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений можем условно записать:

$$\delta = \delta_{max} \times \sin(\Omega t + \varphi_\delta); \quad (14)$$

где  $\delta_{max}$  – величина максимального перемещения ЯП относительно его нейтрального расположения;  $\Omega$  – угловая частота перемещения сердечника;  $\varphi_\delta$  – начальная фаза перемещения ЯП (для рассматриваемого случая считаем, что  $\varphi_{\delta=0}$ ).

Тогда, в соответствии с (2) и (14) будем иметь:

$$\Delta L = \mu \times w^2 \times \mu \times (D_2 - D_1) \times (l_k)^{-1} \times \delta = Q \times \delta_{max} \times \sin \Omega t \quad (15)$$

Для перевода двух КД в режим синхронного детектирования совместим векторы опорных напряжений КД на комплексной плоскости с соответствующими составляющими вектора питающего напряжения мостовой цепи  $\dot{U}_0$ . В этом случае, с учетом выражения (11) и (15), а также ранее сделанных замечаний, для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста можем записать:

$$\Delta U_{Im}(t) = S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{ОП_{max}} \times \frac{1}{R^*} \times \Delta X_L = \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{ОП_{max}} \times \delta_{max} \times \sin \Omega t \quad (16)$$

где  $Q = \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times (R^* \times l_k)^{-1}$  – конструктивный коэффициент ДВ;  $S_{Im}$  – коэффициент преобразования СД для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста.

Для общего случая величина осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений может быть с достаточной точностью представлена следующим математическим рядом:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n \delta_i \times \sin(\Omega_i t + \varphi_i). \quad (17)$$

Тогда, с учетом (17) выражение (16) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \Delta U_{Im}(t) &= \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{ОП_{max}} \times \delta(t) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{ОП_{max}} \times \sum_{i=1}^n \delta_i \times \sin(\Omega_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (18)$$

Из выражения (18) определяется закон изменения  $\delta(t)$ , в соответствии с которым, используя решение дифференциального уравнения (3), находится в итоге и величина ускорения перемещения корпуса вибродатчика в абсолютной системе координат.

Полученное выражение (18) отражает четко выраженную функциональную зависимость приращения мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста от величины перемещения ЯП, вызываемой внешними вибрациями, характеристики временных реализаций которых косвенно отражают происходящие в конструктивных элементах ЛЭП критические деградационные процессы.

**Система мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП.** Предлагаемый новый тип ДВ ориентирован на применение в составе системы мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП, обобщенный вариант структуры которой представлен на рисунке 6: ДП – диспетчерский пункт; УП – устройство присоединения для вывода информационного сигнала с фидера ЛЭП; С – PLC-сервер; 1, 2, ... N – номера опор ЛЭП; 1.1, 2.1 ... N.1 – сенсорные модули опор ЛЭП, включающие в себя соответствующие ДВ; 1.2, 2.2, ... N.2 – PLC-модемы для преобразования и ввода информационного сигнала в фидеры соответствующих опор ЛЭП; 1.3, 2.3 ... N.3 – устройства присоединения для ввода информационного сигнала в фидеры соответствующих опор ЛЭП.

В данном случае система мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, использующей существующие линии электропередач в качестве физической среды передачи данных, т.е. реализующей технологию Power Line Communications (PLC), в основе которой лежит принцип множественного доступа “точка – множество точек” [29-31].

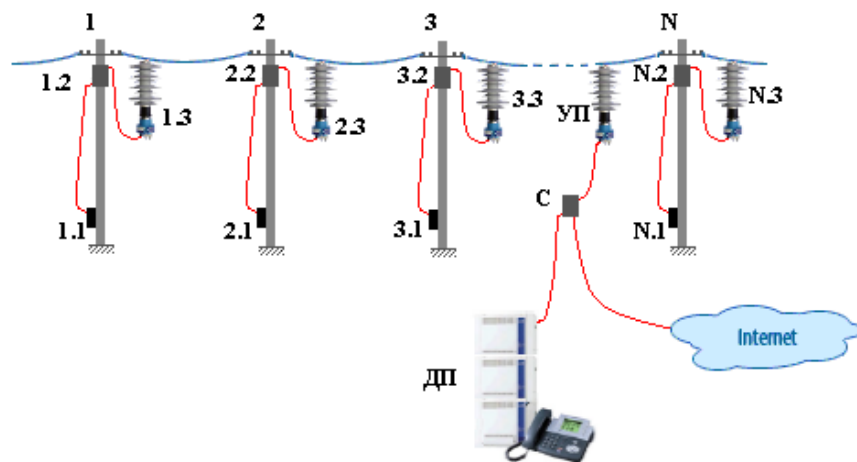


Рис. 6. Обобщённая структура системы мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП

Fig. 6 Generalized structure of the system for monitoring the state of structural elements of power transmission lines

Следует отметить, что предлагаемая система мониторинга представляет собой совокупность множества сенсорных информационных  $N$  подсистем, каждая из которых, в свою очередь, состоит из соответствующих функциональных компонентов: сенсорного модуля  $N.1$ , PLC-модема  $N.2$  и вводное устройство присоединения  $N.3$ , представляющего собой специальное устройство на базе высоковольтного конденсатора. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей ЛЭП, вызванные воздействиями ветровых потоков и фоновыми колебаниями почвы под основанием опор ЛЭП, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который в последующем через соответствующие PLC-модем и вводное устройство присоединения передается в линию электропередачи. Данный информационный сигнал по силовым линиям электропередачи через УП выводится на PLC-сервер, с выходов которого преобразованный информационный сигнал поступает в диспетчерский пункт ДП, представляющий собой автоматизированное рабочее место диспетчера, где аккумулируется и соответствующим образом обрабатывается вся необходимая мониторинговая информация о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП.

### Заключение

Опоры воздушных ЛЭП в значительной степени определяют надежность и долговечность ЛЭП в целом. Диагностика их состояния позволяет избежать возникновения аварийных ситуаций из-за их разрушений, приводящих к большим затратам, связанным с

восстановлением ЛЭП и перерыву в электроснабжении. Одним из наиболее достоверных и информативных способов диагностики является количественная оценка состояния опор ЛЭП, полученная с помощью вибродиагностики, где рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП при их эксплуатации, возникающие под воздействием естественных возмущающих факторов в виде ветровых потоков и колебаний почвы под основанием опор ЛЭП. Для решения этой задачи разработан ДВ соленоидного типа с новым принципом действия, предназначенный для измерения низкочастотных динамических процессов. В работе рассмотрены основные физические процессы, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения, а также приведено теоретическое обоснование работоспособности предложенного варианта ДВ. Конструктивной особенностью предложенного ДВ является отсутствие катушки возбуждения, причем его функциональные элементы образуют полноценный измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным коаксиально внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами проволочных обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что гарантирует даже при минимальных значениях рабочих токов максимальное значение напряжений на измерительных катушках. Это обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого датчика в целом, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

На базе разработанного датчика предложена концепция построения системы мониторинга целостности опор ЛЭП, которая фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, использующей существующие ЛЭП в качестве физической среды передачи данных, т.е. реализующей технологию PLC. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей опоры ЛЭП, вызванные рабочими воздействиями, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который составляет основу мониторинговой информации о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП. В качестве диагностических признаков могут быть использованы различные характеристики вибрационного состояния ЛЭП, которое отражает в свою очередь соответствующие происходящие деградационные процессы в структуре материала ее конструктивных элементов.

#### Литература

1. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат, 2009. 332 с.
2. Ведерников А. С., Гольдштейн В. Г., Халилов Ф. Х. Повышение надежности и энергоэффективности двухцепных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2010. 272 с.
3. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Review from the Perspective of Contactless Technologies // Sensing and imaging. 2017, volume18, number1, pp. 1-18.
4. Хамидуллин И. Н., Ильин В. К. К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи 35-500 КВ // Электротехнические комплексы и системы, 2016, №1, т. 12. С. 45-53.
5. Zhi-xiong Liu, Xiao-bo Feng. A Real-Time Reliable Condition Assessment System for 500kV Transmission Towers Based on Stress Measurement. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 8 pp.
6. Seale, R.D., R. Shmulsky, E.D. Entsminger, et al. Field test of a novel nondestructive testing device on wood distribution poles. // Journal of Wood and Fiber Science 2016, 48(3):156-161.
7. Kliukas R., Daniūnas A., Gribniak V., et al. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessment. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 14 (1).
8. Соловьёв С.В. Контроль технического состояния металлических опор воздушных линий электропередач // В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 171-174.
9. Mahmoudi\_A., Jafari\_M.A., Nasrollahzadeh K. Reliability-based approach to fragility analysis of lattice transmission tower in the type test\_Engineering, 2022, 29(3), pp. 1125-1141.

10. Привалов, Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ-Д, 2015. 226 с.
11. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередач. Новосибирск: Наука, 2009. 137 с.
12. Ashraf M., Ahmad H.M., Siddiqi Z.A. A study of power transmission poles // Asian journal of civil engineering (building and housing), 2005, vol. 6, no. 6, pp. 511-532.
13. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Горячев М.П., и др. Анализ современных методов оценки состояния воздушных линий электропередачи по механическим параметрам проводов (обзор) // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2021, том 85, № 11. С. 1600-1606.
14. Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. Методика контроля механических параметров воздушных линий электропередачи на основе улучшенного инклинометрического метода. Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2019;21(3):160-171.
15. Колодий А. Диагностика оборудования воздушных линий электропередач. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. 38 с.
16. Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А. Анализ напряженно-деформированного состояния опоры воздушных линий электропередачи под действием ветровых нагрузок на провода электросети // В сборнике: Наука Промышленность Оборона. Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции. В 4-х томах. Под редакцией С.Д. Саленко. 2018. С. 51-54.
17. Гунгер Ю.Р., Чернев В.Т. Диагностика опор и фундаментов воздушных линий электропередачи. Современные методы оценки. // Новости электротехники, № 2. 2006. С. 134-136.
18. Белозеров Б.К., Лиманов И.Я., Белалами С. Краткий анализ диагностических приборов контроля состояния опор воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С. 128-131.
19. Бурнышева Т.В., Кожевников А.Н. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 2 (110). С. 1-12.
20. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надёжность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
21. Кожевников А., Сафонов О., Тарасов А. Экспресс-оценка работоспособности опор воздушных линий электропередачи по динамическим параметрам // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S3 (22). С. 27-29.
22. Белалами С., Попов Д. В. Акустический контроль опор линий электропередачи (ЛЭП) // Контроль. Диагностика. 2015, №7. С. 26-32.
23. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
24. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. М: Машиностроение, 1987. 256 с.
25. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
26. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 228-234.
27. Брякин, И.В. Электродинамический акселерометр // Проблемы автоматики и управления, 2012, №2. С.154-148.
28. 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.
29. Брякин И.В., Гришин В.М. Система мониторинга технического состояния зданий // Проблемы автоматики и управления, 2014, № 1 (26). С. 144-155.
30. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Корякин С.В. Способ передачи информации по сетям электропитания / Патент РФ на изобретение № 2749963. 21.06.2021, Бюл. № 18.
31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., et al. Device for Data Communication along Power Lines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Pp. 7-12.

### 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@yandex.ru](mailto:bivas2006@yandex.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](mailto:elmech@mail.ru).

### References

1. Skopintsev V.A. The quality of electric power systems: reliability, safety, economy, survivability. M.: Energoatomizdat, 2009. 332 p.
2. Vedernikov A. S., Goldstein V. G., Khalilov F. Kh. Improving the reliability and energy efficiency of double-circuit transmission lines. M.: Energoatomizdat, 2010. 272 p.
3. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Re-view from the Perspective of Contactless Technologies. Sensing and imaging. 2017, volume18, number1, pages 1-18. DOI:10.1007/s11220-017-0172-9.
4. Khamidullin I. N., Ilyin V. K. On the issue of the reliability of overhead power lines 35-500 kV // Electrotechnical complexes and systems, 2016, No. 1, vol. 12. P. 45-53. (In Russ).
5. Zhi-xiong Liu, Xiao-bo Feng. A Real-Time Reliable Condition Assessment System for 500kV Transmission Towers Based on Stress Measurement. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 8 pp. doi.org/10.1155/2019/3241897.
6. Seale, R.D., R. Shmulsky, E.D. Entsminger, et al. Field test of a novel nondestructive test-ing device on wood distribution poles. // Journal of Wood and Fiber Science 2016, 48(3):156-161.
7. Kliukas R., Daniūnas A., Gribniak V., et al. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessmen. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 14(1), DOI:10.1080/15732479.2017.1402068.
8. Solovyov S.V. Control of the technical condition of metal supports of overhead power lines // In the collection: Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific-practical conference. 2018. S. 171-174. (In Russ).
9. Mahmoudi A., Jafari M.A., Nasrollahzadeh K. Reliability-based approach to fragility analysis of lattice transmission tower in the type test. Engineering, 2022, 29(3), pp. 1125-1141.
10. Privalov, E.E. Diagnostics of electric power equipment. Stavropol: Publishing house PARAGRAPH-D, 2015. 226 p.
11. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. Modern methods for diagnosing overhead power lines. Novosibirsk: Nauka, 2009. 137 p.
12. Ashraf M., Ahmad H.M., Siddiqi Z.A. A study of power transmission poles // Asian journal of civil engineering (building and housing), 2005, vol. 6, no. 6, pp. 511-532.
13. Sadykov M.F. Yaroslavsky D.A., Goryachev M.P., et al. Analysis of modern methods for assessing the state of overhead power lines by the mechanical parameters of wires (review) // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Physical series. 2021, Volume 85, No. 11. S. 1600-1606. (In Russ). DOI:10.31857/s0367676521110326.
14. Goryachev M.P., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Method for controlling the mechanical parameters of overhead power lines based on an improved inclinometric method. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2019; 21(3):160-171. (In Russ). doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-160-171.
15. Kolodiy A. Diagnostics of equipment for overhead power lines. Stavropol: PARAGRAPH Publishing House, 2014. 38 p.
16. Kozhevnikov A.N., Krasnorutsky D.A. Analysis of the stress-strain state of the support of overhead power lines under the influence of wind loads on the wires of the power grid // In the collection: Science Industry Defense. Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference. In 4 volumes. Edited by S.D. Salenko. 2018. S. 51-54. (In Russ).
17. Gunger Yu.R., Chernov V.T. Diagnostics of supports and foundations of overhead power lines. Modern assessment methods. // News of electrical engineering, No. 2. 2006. P. 134-136.
18. Belozarov B.K., Limanov I.Ya., Belalami S. Brief analysis of diagnostic devices for monitoring the state of overhead transmission line supports. Transfer and distribution. 2020. No. 1 (58). pp. 128-131. (In Russ).

19. Burnysheva T.V., Kozhevnikov A.N. Methodology for assessing the technical condition of overhead power transmission line supports, taking into account typical operational defects // Engineering Journal: Science and Innovations. 2021. No. 2 (110). pp. 1-12. (In Russ). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-2-2053.
20. Yurkevich V.V., Skhirtladze A.G. Reliability and diagnostics of technological systems. M.: Publishing Center "Academy", 2011. 304 p.
21. Kozhevnikov A., Safonov O., Tarasov A. Express-assessment of the performance of overhead power transmission line supports by dynamic parameters // Electricity. Transmission and distribution. 2021. No. S3 (22). pp. 27-29. (In Russ).
22. Belalami S., Popov D. V. Acoustic control of transmission line supports (TL) // Control. Diagnostics. 2015, No. 7. pp. 26-32. DOI: 10.14489/td.2015.07.
23. Fedotov A.V. Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems. Omsk: Publishing house of OmGTU, 2011. 176 p.
24. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevsky M.L. Electromagnetic sensors of mechanical quantities. M: Mashinostroenie, 1987. 256 p.
25. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
26. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, 2014, pp. 228-234.
27. Bryakin, I.V. Electrodynamic accelerometer // Problems of automation and control, 2012, no. 2. pp.154-148. (In Russ).
28. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Electrode-inductive vibration sensor with capacitive coupling // Electrotechnical systems and complexes. 2021. No. 4(53). pp. 39-49. (In Russ). doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49.
29. Bryakin I.V., Grishin V.M. The system for monitoring the technical condition of buildings // Problems of automation and control, 2014, No. 1 (26). pp. 144-155. (In Russ).
30. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Koryakin S.V. Method for transmitting information over power networks / Patent RUS № 2749963. 06.21.2021, Byul. № 18.
31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., et al. Device for Data Communication along Power Lines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Pp. 7-12. (In Russ). DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216280.

#### **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.

**Получено**

**11.07.2022 г.**

**Отредактировано**

**03.08.2022 г.**

**Принято**

**04.08.2022 г.**