

УДК 621.315.66

*И.В. Брякин¹, И.В. Бочкарев², Т.Э. Умаров²*¹*Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР*²*Кыргызский Государственный Технический Университет им. И. Раззакова*

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассмотрены особенности конструкции и эксплуатации опор ЛЭП, проанализированы используемые на практике методы диагностики и контроля их элементов. Разработан феррозондовый датчик с новым принципом возбуждения на базе электромагнитно-акустического измерительного преобразования для неразрушающего контроля стальных и металлоемких элементов опор ЛЭП. Описаны конструктивное исполнение и принцип работы датчика, проанализированы протекающие в нем физические процессы. Выполнено математическое описание совместного действия электромагнитного, акустического и магнитомодуляционного эффектов в феррозондовом датчике. Новый тип феррозонда для дефектоскопии обеспечивает существенное конструктивное упрощение, которое связано с тем, что его обмотки совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения; и регистрация информационного сигнала. Кроме того, он обладает повышенной помехозащищенностью и повышенной чувствительностью без ухудшения точности преобразования за счет использования различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями. Произведены экспериментальные исследования разработанного феррозондового датчика, которые показали, что разработанный датчик позволяет регистрировать дефекты на большой глубине залегания и имеет повышенную чувствительность.

Ключевые слова: линии электропередачи, опоры, дефектоскопия и неразрушающий контроль, феррозондовый датчик, модуляция магнитной проницаемости, электромагнитно-акустический эффект, акустические волны, магнитный поток, напряженность переменного магнитного поля.

Введение

Электроэнергетика является основной бюджетообразующей отраслью Кыргызстана. Энергетическая система республики полностью обеспечивает электрической энергией все отрасли экономики и население, а также позволяет осуществлять ее экспорт в другие страны [1]. Поэтому обеспечение высокой степени надежности ее работы является для Кыргызстана важной задачей.

Одной из ключевых составляющих любой энергетической инфраструктуры являются электрические сети, обеспечивающие передачу электроэнергии от мест ее генерации к местам потребления. Их особенность состоит в большой протяженности, что принципиально затрудняет процесс их эксплуатации. Например, общая протяженность линий электропередачи (ЛЭП) в Кыргызстане составляет примерно 70 000 км, причем многие ее участки находятся в эксплуатации уже длительное время, превышающее установленный срок их службы. Поэтому для обеспечения гарантированной надежности электроснабжения требуется оперативная реконструкция таких старых участков ЛЭП исходя из нормативных сроков их службы. Однако такая масштабная работа, с одной стороны, требует огромных капиталовложений и времени, а с другой – не всегда оправдана с технической точки зрения, поскольку не учитывает фактическое состояние различных элементов ЛЭП, и процесс такой реконструкции, основанной только на учете времени их нахождения в эксплуатации, может привести к выводу из эксплуатации и замене еще вполне исправного и работоспособного оборудования, что экономически совершенно не оправдано. Очевидно, что необходимо проводить «адресно-восстановительный ремонт» на базе результатов текущего диагностического контроля [2, 3].

Надежность работы ЛЭП обусловлена совокупностью целого ряда факторов и определяется надежностью функционирования всех элементов, входящих в ее состав. Поэтому в систему комплексной диагностики состояния воздушных линий электропередачи в обязательном порядке должен входить контроль состояния всех основных конструктивных элементов ЛЭП- проводов, заземляющих и грозоотводных тросов, изоляторов, опор, оттяжек и т.д. В данной работе рассматриваются вопросы диагностики и контроля технического состояния опор ЛЭП различных конструкций.

Цель исследования. Одну из ключевых функций в составе ЛЭП выполняют опоры, которые поддерживают провода на необходимой высоте, обеспечивая тем самым безопасную передачу электрической энергии. Очевидно, что их техническое состояние однозначно определяет безопасность и надежность работы всей ЛЭП в целом. Так, по статистическим данным, среди всех повреждений воздушных ЛЭП 6-10 кВ примерно 20% аварийных отключений по количеству и 28% по длительности обусловлены именно разрушением опор [4]. При этом выход из строя опор приводит к большим затратам, связанным с восстановлением ЛЭП, перерыву в электроснабжении и даже к рискам угрозы жизни и здоровью персонала и населения. Поэтому требуется их регулярное обследование, которое позволяет выявлять повреждения и дефекты на ранних стадиях их образования и развития, предотвращая тем самым аварийные ситуации и снижая экономические издержки на ремонт. Следовательно, контроль состояния опор линий электропередачи является весьма актуальной задачей, имеющей значительную практическую ценность.

Особенности конструкции и эксплуатации опор ЛЭП. Очевидно, что прочность конструкции ЛЭП, ее долговечность и устойчивость к воздействию внешних механических и природных факторов однозначно зависят от конструкции и типа опор. К основным элементам опор относят фундамент, стойки, подкосы, растяжки. При этом конструкции опор ЛЭП весьма разнообразны и в значительной степени зависят от материала, из которого они изготовлены. На воздушных ЛЭП применяются деревянные, стальные, железобетонные опоры, а также опоры из композитного материала. Кроме того, конструкции опор зависят от категории передаваемого ЛЭП напряжения, а также от условий в местах их установки (качество грунта, атмосферные и погодные условия, техногенные факторы и т.д.).

По конструктивному исполнению опоры ЛЭП можно разделить на два типа – свободностоящие и опоры на оттяжках. Оттяжки обычно выполняются из стальных тросов и служат для удержания деревянных или железобетонных опорных стоек в вертикальном положении и защищают их от падения или возможных наклонов и поперечных перемещений. При этом используют талреп, представляющий собой такелажное приспособление, позволяющее регулировать силу натяжения троса и выполненное в виде двойной винтовой стяжки, в которую с двух сторон закручивают винты с разнонаправленной резьбой. При повороте корпуса талрепа эти винты позволяют изменять рабочую длину и таким образом натяжение троса оттяжки. Следовательно, при диагностике опор второго типа необходим контроль как самого тела опоры, так и оттяжки.

На конструктивные элементы опоры ЛЭП в процессе их эксплуатации воздействуют различные внешние и внутренние факторы, основными из которых являются:

- климатические воздействия (ветер, снег, перепады температуры, землетрясения, оползни и т.п.);
- механическое воздействие в виде статических и динамических нагрузок, в том числе от электродинамической нагрузки электрической сети;
- коррозия и старение материалов.

Все указанные факторы приводят к износу опор, что может привести к возникновению различных аварийных ситуаций – к потере прочности и деформации опоры; к трещинам, разрушению и наклону опор; к нарушению целостности креплений и т.п. Например, в октябре 2021 года из-за обильного снегопада, сильного ветра и большого налипания мокрого снега на провода на горном перевала Сары-Кыр верхняя часть железной опоры загнулась, и все три отходящих фазных провода ЛЭП 110 кВ «Урумбаш — Жетиген» были оборваны. В

целом на аварийно-восстановительные работы ушло 13 дней. В ноябре 2021 года из-за сильного ветра упала железобетонная опора на подстанции Быстровка, а в феврале 2024 года из-за сильного ветра в селах Чырпыкты, Кош-Кол, Тамчи и Чок-Тал Иссык-Кульской области были повалены пять опор линии электропередачи, что привело к масштабным сбоям электроснабжения. Все это подчеркивает важность достоверной и своевременной диагностики и контроля технического состояния опор ЛЭП в реальных условиях эксплуатации.

Методы диагностики и контроля элементов опор ЛЭП

Диагностика и мониторинг технического состояния элементов ЛЭП должны осуществляться на всех этапах их жизненного цикла – при проектировании, изготовлении, строительстве, реконструкции и реновации. При этом существуют различные виды диагностики (плановая, периодическая, внеочередная, аварийной и др.), отличающиеся задачами и объемом контрольных мероприятий и, соответственно, различными методами и оборудованием [5].

На практике наиболее распространенным методом оценки технического состояния опор ЛЭП является визуальный контроль. Конечно, этот метод наиболее простой и экономичный, поскольку не требует никакого специального оборудования. Однако он позволяет зафиксировать только уже наступившие дефекты, причем лишь в тех местах, которые доступны для визуального осмотра. Внутренние дефекты, а тем более еще только зарождающиеся зоны отклонения параметров от их нормированного состояния, которые впоследствии могут привести к неминуемым аварийным ситуациям, такой метод контроля не может выявить в принципе. Поэтому требуются другие методы диагностики опор ЛЭП, которые позволяют осуществлять контроль их внутреннего состояния, причем непосредственно в режиме эксплуатации.

В настоящее время для диагностики технических объектов наиболее целесообразно применять неразрушающие способы контроля. Именно неразрушающий контроль (НК) является основой контроля различных технических объектов, обеспечивая их безопасную и надежную работу без ущерба для дальнейшего использования [6 - 8]. НК позволяет проводить оперативный мониторинг качества контролируемых объектов непосредственно в процессе эксплуатации, предотвращая тем самым их преждевременную поломку и аварию. При этом выбор метода контроля технического состояния опор зависит от их конструкции и материала, из которого они изготовлены. Следует отметить, что при диагностике элементов опор ЛЭП используют и разрушающие методы. Например, оценку темпа снижения механической прочности троса оттяжек опор проводят в лабораторных условиях путем механических испытаний на разрыв образцов оттяжек, полностью демонтированных с опоры. Однако очевидно, что такой способ контроля не только имеет большую трудоемкость, но и не может быть использован в полевых условиях непосредственно для контроля опор, находящихся в эксплуатации.

При реализации НК для выявления наличия дефектов или неоднородностей, их характера, размера и месторасположения могут использоваться различные способы, основанные на оптических, электрических, магнитных, акустических и других свойствах материалов [9, 10]. Поскольку опоры ЛЭП содержат компоненты, изготовленные из ферромагнитных конструкционных материалов, то НК их качества наиболее целесообразно проводить на основе магнитных измерений [11, 12]. В магнитной дефектоскопии для выявления подповерхностных дефектов преимущественно используют феррозондовые преобразователи, содержащие в своем составе феррозондовый датчик (ФД) [13, 14]. Их работа основана на поиске магнитных полей рассеяния, возникающих в зоне подповерхностных дефектов – в зонах концентрации продольных и поперечных напряжений, в зонах пластической деформации, в зонах изменения структуры металла, на участках предразрушения и разрушения металла. Это позволяет осуществлять контроль технического состояния ферромагнитного объекта. ФД осуществляет контроль изменения напряженности магнитного поля над дефектом и преобразует градиент напряженности поля в электрической

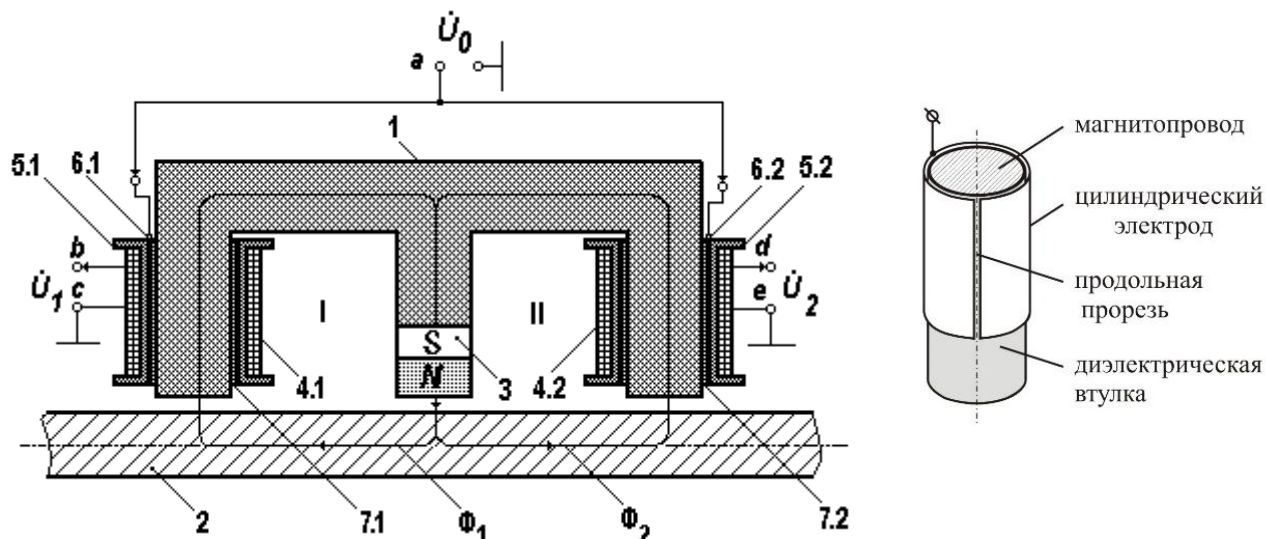
сигнал. По сравнению с другими датчиками $\Phi Д$ имеют ряд преимуществ, а именно, небольшие габариты и потребляемую мощность, высокие чувствительность и надежность работы, стойкость к внешним воздействиям, избирательность к локальным магнитным полям рассеяния и др. Бесконтактный магнитометрический метод-контроль технического состояния металлических конструкций опор ЛЭП с использованием $\Phi Д$ обеспечивает обнаружение и регистрацию дефектных участков в виде наличия трещин, раковин и т.п., а также позволяет классифицировать зарождающиеся и развивающиеся дефекты по степени опасности. Данный метод может быть использован для контроля металлических конструкций опор при их сооружении и периодических технических освидетельствованиях, а также для оптимизации объемов при капитальном ремонте ЛЭП. Поэтому системы НК на базе $\Phi Д$ в настоящее время активно развиваются и совершенствуются [15-19].

Наряду с магнитными способами контроля для НК опор на практике используются акустические методы, основанные на том, что в контролируемом объекте возбуждают акустические волны, последующий анализ которых позволяет получить информацию о структуре материала и его параметрах, изменяющихся при наличии дефектов. Контроль параметров ультразвуковой волны позволяет судить о структурных изменениях в материале опоры, содержании примесей, характере распределений внутренних напряжений и др. [20, 21]. При этом акустические методы НК имеют высокую чувствительность и проникающую способность, а также высокую производительность и безопасность выполнения контрольных процедур.

Таким образом, каждый из этих известных методов НК реализует какой-либо один физический эффект, который однозначно определяет как возможности самого метода, так и особенности его реализации. Очевидно, что повышения эффективности контроля технического и коррозионного состояния металлоконструкций опор ЛЭП можно добиться путем одновременного использования систем магнитного контроля и систем акустического контроля. Однако такие комплексные испытания, требующие применения различного специализированного оборудования, являются весьма трудоемкими и затратными.

Результаты исследования и их обсуждение

На базе проведенных исследований авторами разработан вариант $\Phi Д$ с новым принципом возбуждения, основанным на одновременном использовании электромагнитно-акустического и магнитомодуляционного эффектов (ЭМА-эффект и ММЭ-эффект). Посредством данного $\Phi Д$ фактически реализуется метод НК, объединяющий в себе потенциальные возможности трех магнитных методов НК: постоянного магнитного поля, переменного магнитного поля и феррозондового метода. При этом не требуется обязательная процедура предварительного намагничивания материала объекта контроля. В этом случае постоянное магнитное поле используется в качестве зондирующего физического поля, модулируемого через μ -преобразование переменными магнитным полем, а уровень вариативности этого процесса зависит от состояния структуры материала объекта контроля. Вариант конструкции нового типа $\Phi Д$ представлен на рисунке 1.



а)

б)

Рисунок 1 – Вариант конструктивного решения $\Phi Д$

На рисунке 1 обозначено: 1 – Ш-образный магнитопровод ($ШМ$) из диэлектрического ферромагнетика; 2 – объект контроля ($ОК$) в виде конструктивного элемента из ферромагнитного материала; 3 – постоянный магнит ($ПМ$); 4.1 и 4.2 – электрические обмотки соответственно первой и второй измерительных катушек ($ИК_1$ и $ИК_2$); 5.1 и 5.2 – диэлектрические каркасы соответственно $ИК_1$ и $ИК_2$; 6.1 и 6.2 – первый и второй цилиндрические электроды ($ЦЭ_1$ и $ЦЭ_2$), являющиеся элементами возбуждения соответственно для $ИК_1$ и $ИК_2$; 7.1 и 7.2 – диэлектрические цилиндрические втулки, локально расположенные на отдельных участках $МП$; a – клемма подключения напряжения возбуждения $\dot{U}_0$ относительно «корпуса»; b и d – клеммы съема выходных сигналов $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ соответственно $ИК_1$ и $ИК_2$ относительно «корпуса», являющиеся «началом» соответственно электрических обмоток 4.1 и 4.2. Цилиндрические электроды $ЦЭ_1$ и $ЦЭ_2$ выполнены из электропроводящего материала (медь, алюминий и т.д.) в виде тонкостенных трубок с прорезью вдоль образующей и расположены коаксиально на внутренней поверхности соответственно диэлектрических каркасов 5.1 и 5.2 (рис. 1, б). При контроле опоры ЛЭП в качестве $ОК$ используется ее элемент, подлежащий диагностике, например, стальная оттяжка.

Особенностью данного типа $\Phi Д$ является применение в качестве сигнальных выходов $ИК_1$ и $ИК_2$ (относительно «корпуса») одноименных выводов их электрических обмоток («начало» обмоток), что в свою очередь является одним из основных условий для нормального функционирования рассматриваемого варианта $\Phi Д$. Кроме того, $ЦЭ_1$ образует совместно с нижним проволочным слоем обмотки $ИК_1$ конденсатор связи $C'_{св}$, а $ЦЭ_2$ образует совместно с нижним проволочным слоем обмотки 4.2 $ИК_2$ конденсатор связи $C''_{св}$. Напряжение возбуждения $\dot{U}_0$ относительно «корпуса» подается через конденсаторы связи $C'_{св}$ и $C''_{св}$ соответственно на «начало» электрических обмоток $ИК_1$ и $ИК_2$, имеющих «согласное» пространственное расположение («начало-конец») на $ШМ$.

$ШМ$ образует вместе с $ОК$ два взаимосвязанных ферромагнитных контура $\Phi К-I$ и $\Phi К-II$, через которые определенным образом конфигурируются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , инициируемые совмещенными физическими полями: постоянным магнитным полем $ПМ$ и переменными магнитными полями, создаваемыми токами возбуждения электрических обмоток $ИК_1$ и $ИК_2$,

При подаче от генератора высокой частоты электрического потенциала $\varphi_э$ относительно электрического потенциала «корпуса» (точки заземления) φ_0 на $ЦЭ_1$ и $ЦЭ_2$ на нижнем проволочном слое первой обмотки $ИК_1$ и нижнем проволочном слое обмотки $ИК_2$ будут индуцироваться соответствующие электрические потенциалы $\varphi'_э$ и $\varphi''э$. При этом вследствие симметричного пространственного расположения проходных катушек и идентичности их конструктивных параметров можно считать, что $\varphi'_э = \varphi''э = \varphi_э$. Необходимый уровень симметрии в пространственном расположении проходных катушек и балансировка минимального уровня нулевого сигнала обеспечивается соответствующим осевым перемещением секций проходных катушек относительно постоянного магнита.

Тогда в режиме последовательного электрического резонанса (на циклической частоте ω_p) токи через электрические обмотки $ИК_1$ и $ИК_2$ описываются выражением:

$$i_1(t) = i_2(t) = i(t) = (\varphi_э - \varphi_0) / R = u_0(t) / R = (U_{0m} \times \cos \omega_p t) / R, \quad (1)$$

где $\varphi_0 = 0$; $R = R_1 = R_2$; R_1 и R_2 – активные сопротивления соответственно секции 3' и 3'' обмотки катушки; U_{0m} – амплитуда электрического напряжения от генератора высокой частоты.

В этом случае напряженность переменного магнитного поля, создаваемая токами возбуждения $ИК_1$ и $ИК_2$, можно формализовать в следующем виде:

$$H_1(t) = H_2(t) = H(t) = \frac{2 \times \sqrt{2} \times w \times U_{0m}}{l \times R} \times \cos \omega_p t = H_m \times \cos \omega_p t, \quad (2)$$

где $l = l_1 = l_2$ – длина намотки электрических обмоток $ИК_1$ и $ИК_2$; $w = w_1 = w_2$ – количество витков электрических обмоток $ИК_1$ и $ИК_2$; H_m – амплитуда напряженности магнитного поля, создаваемая током $i(t)$:

$$H_m = \frac{2 \times \sqrt{2} \times w \times U_{0m}}{l \times R}. \quad (3)$$

Рассмотрим вопросы, связанные с особенностями формирования магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} в магнитопроводах соответственно ΦK -I и ΦK -II.

В соответствии с законами электротехники для магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} , создаваемых в каждом из ΦK -I и ΦK -II, можно соответственно записать:

$$\Phi_I = \frac{F_I}{R'_{IM} + R''_{IM} + R'''_{IM}} = \frac{F_I}{R^*_{IM} + R'''_{IM}}; \quad \Phi_{II} = \frac{F_{II}}{R'_{IIM} + R''_{IIM} + R'''_{IIM}} = \frac{F_{II}}{R^*_{IIM} + R'''_{IIM}}, \quad (4)$$

где $F_I = F_I^- + F_I^+$ – суммарная намагничивающая сила в ΦK I, F_I^- и F_I^+ – намагничивающие силы, создаваемые соответственно H_0 и $H(t)$ в ΦK -I; $F_{II} = F_{II}^- + F_{II}^+$ – суммарная намагничивающая сила в ΦK -II, F_{II}^- и F_{II}^+ – намагничивающие силы, создаваемые соответственно H_0 и $H(t)$ в ΦK -II; R'''_{IM} – магнитное сопротивление участка OK , находящегося в рабочей зоне ΦK I и являющегося его контролируемым элементом; $R^*_{IM} = R'_{IM} + R''_{IM}$ – суммарное магнитное сопротивление конструктивных элементов ΦK I; R'_{IM} и R''_{IM} – магнитное сопротивление соответственно ферромагнитного и диэлектрического (воздушный зазор) конструктивных элементов ΦK -I; R'''_{IIM} – магнитное сопротивление участка OK , находящегося в рабочей зоне ΦK -II и являющегося его контролируемым элементом; $R^*_{IIM} = R'_{IIM} + R''_{IIM}$ – суммарное магнитное сопротивление конструктивных элементов ΦK -II, R'_{IIM} и R''_{IIM} – магнитное сопротивление соответственно ферромагнитного и диэлектрического (воздушный зазор) конструктивных элементов ΦK -II.

Следует заметить, что $R^*_{IM} = R^*_{IIM} = R^*_M = \text{const}$, т.к. являются параметрами идентичных конструктивных элементов ΦK -I и ΦK -II, а R'''_{IM} и R'''_{IIM} являются вариативными параметрами контролируемых элементов соответственно ΦK -I и ΦK -II, которые при отсутствии дефекта в рабочих зонах ΦK -I и ΦK -II соответствуют условию $R'''_{IM} = R'''_{IIM} = R'''_M$. Кроме того, считается, что $R'''_{IM} \gg R^*_M$ и $R'''_{IIM} \gg R^*_M$. С учетом этих замечаний из (4) получим:

$$\Phi_I = \frac{F_I}{\left(1 + \frac{G'''_{IM}}{G^*_{IM}}\right)} \times G'''_{IM} = F_I \times G'''_{IM} = F_I \times \mu'''_{IM} \times \frac{l'''_{IM}}{S'''_{IM}}; \quad (5)$$

$$\Phi_{II} = \frac{F_{II}}{\left(1 + \frac{G'''_{IIM}}{G^*_{IIM}}\right)} \times G'''_{IIM} = F_{II} \times G'''_{IIM} = F_{II} \times \mu'''_{IIM} \times \frac{l'''_{IIM}}{S'''_{IIM}},$$

где $G'''_{IM} = 1/R'''_{IM} = \mu'''_{IM} \times \frac{l'''_{IM}}{S'''_{IM}}$ и $G'''_{IIM} = 1/R'''_{IIM} = \mu'''_{IIM} \times \frac{l'''_{IIM}}{S'''_{IIM}}$ – магнитные проводимости

участков OK , находящихся в рабочих зонах соответственно ΦK -I и ΦK -II; $G^*_{IM} = 1/R^*_{IM}$ и

$G_{II_M}^* = 1/R_{II_M}^*$ суммарные магнитные проводимости конструктивных элементов соответственно $\Phi K-I$ и $\Phi K-II$; μ_{I_M}''' , l_{I_M}''' и s_{I_M}''' – соответственно магнитная проницаемость, длина и площадь сечения участка OK , находящегося в рабочей зоне $\Phi K-I$; μ_{II_M}''' , l_{II_M}''' и s_{II_M}''' – соответственно магнитная проницаемость, длина и площадь сечения участка OK , находящегося в рабочей зоне $\Phi K-II$; $G_{I_M}''' / G_{I_M}^* \ll 1$; $G_{II_M}''' / G_{II}^* \ll 1$.

Из анализа выражений (5) следует важный вывод о том, что свойство неизменности параметров магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} во времени главным образом определяется уровнем вариативности параметров μ_{I_M}''' и μ_{II_M}''' .

Магнитная проницаемость μ является основным физическим параметром материала $МП$, который реагирует на внешние воздействия. В данном случае эти воздействия можно разделить на два типа:

- основным воздействием можно считать переменные магнитные поля, возбуждаемые измерительными катушками $ИК_1$ и $ИК_2$. Эти поля инициируют появление магнитомодуляционного эффекта (ММ-эффект);

- дополнительным воздействием является акустическое поле, являющееся проявлением электромагнитно-акустического эффекта (ЭМА-эффект).

Подобное совместное действие магнитных и акустических полей оказывает модулирующее действие на магнитную проницаемость, т.е. μ -преобразование осуществляется за счет одновременного совместного воздействия ММ-эффекта и ЭМА-эффекта. Поэтому с учетом вида физического поля и явлений его взаимодействия с материалом OK в предложенном $ФД$ в режимах излучения и приема в общем случае можно выделить четыре функциональных процесса работы:

- первый процесс – формирование возбуждающего переменного магнитного поля (режим индуктора);

- второй процесс – μ -преобразование за счет ММ-эффекта;

- третий процесс – формирование пространственно-периодических акустических волн (режим ЭМА-преобразователя);

- четвертый процесс – μ -преобразование за счет ЭМА-эффекта.

Следовательно, разработанный вариант $ФД$ по существу является параметрическим модулятором, где модуляция измеряемой величины (постоянное магнитное поле $ПМ$) осуществляется за счет двухфакторного воздействия на магнитную проницаемость μ , т.е. μ -преобразование за счет одновременного совместного воздействия ММ-эффекта и ЭМА-эффекта.

Физические процессы, протекающие в $ФД$

Далее рассмотрим вопросы, связанные с воздействием совмещенных магнитных полей (постоянных и переменных) в $ШМ$ $ФД$ непосредственно на структуру материала электропроводящих ферромагнитных конструктивных элементов ферромагнитных контуров.

Проанализируем подробнее процедуры воздействия на магнитную проницаемость μ каждого из указанных полей.

1) ММ-процесс. Заключается в изменении магнитного состояния ферромагнитного электропроводящего материала OK при одновременном намагничивании в переменном и измеряемом постоянном магнитных полях. Модуляция таким суммарным магнитным потоком возможна за счет нелинейных свойств магнитной цепи, а происходящие в ней процессы всегда связаны с взаимодействием минимум двух магнитных полей – внешнего измеряемого и переменного поля возбуждения, создаваемого, например, за счет протекания электрического тока в катушке возбуждения. С физической точки зрения ММ-процесс по своей сути является режимом функционирования феррозонда с продольным возбуждением. Поэтому в соответствии с существующей параметрической теорией феррозондов с продольным возбуждением можем записать:

$$B_{MM}(t) = \mu_0 \times \mu^*[H(t)] \times H_0 = \mu_0 \times \mu_{MM}^*(t) \times H_0, \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\mu^*[H(t)]$ – закон изменения магнитной проницаемости материала ферромагнитного сердечника под воздействием возбуждающего магнитного поля; $H(t) = H_m \times \sin \omega t$ – напряженность возбуждающего магнитного поля; H_m – амплитуда переменного магнитного поля H_1 ; ω – циклическая частота; H_0 – напряженность постоянного магнитного поля.

При заданной величине поля возбуждающего магнитного поля функция $\mu^*[H(t)]$ может рассматриваться как функция времени $\mu_{MM}^*(t)$.

2) ЭМА-процесс. В основе ЭМА-преобразования лежит явление взаимной трансформации электромагнитных и упругих полей на границе металлических материалов. Прямое ЭМА-преобразование заключается в преобразовании электромагнитных волн в упругие колебания, обратное – в преобразовании упругих волн в электромагнитные волны, а полный процесс преобразования «электромагнитное поле – упругие колебания – электромагнитное поле» является двойным ЭМА-преобразованием. При этом в соответствии с теоремой взаимности акустические характеристики ЭМА-преобразователей при излучении и приеме оказываются идентичными, в частности, сохраняются избирательность волн и диаграммы направленности излучения ЭМА-преобразователей.

Физическая сущность прямого ЭМА-преобразования состоит в том, что под действием падающей электромагнитной волны в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитострикционными свойствами, возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты, причем в преобразовании участвуют подсистемы ферромагнетика различной физической природы: электрическая, магнитная, магнитоупругая и упругая. При этом непосредственным источником возбуждения выступает граница раздела сред, поскольку падение электромагнитной волны на границу проводящего твердого тела сопровождается возбуждением в нем ультразвуковых колебаний [22]. Этот процесс основан на явлении магнитострикции, связанном с взаимодействием магнитной и упругой подсистем магнитной среды и заключающемся в том, что под действием магнитного поля магнетики изменяют свои размеры и форму, за счет чего возникает дополнительная линейная генерация ультразвука. Для генерации упругих волн при использовании магнитострикции в линейном режиме необходимо использовать постоянное подмагничивающее поле [22, 23].

Физическая сущность обратного ЭМА-преобразования состоит в том, что акустические волны действуют на свободные электроны материала ферромагнитного сердечника ΦC_1 и ΦC_2 , за счет чего в электрических обмотках первой и второй измерительных катушек ($ИК_1$ и $ИК_2$) возникает ЭДС. Это свойство основано на том, что продольные упругие L -волны могут эффективно возбуждать спиновые волны [24, 25].

Достигающая поверхностного слоя ферромагнитного объекта исследования акустическая волна, например, отраженная от нижней границы этого объекта либо от имеющегося в нем включения (дефекта) с иными акустическими свойствами, вызывает деформацию доменов этого слоя. Вследствие проявления магнитоупругого эффекта происходит изменение магнитной проницаемости материала поверхностного слоя и, соответственно, изменение индукции B_0 постоянного магнитного поля как в поверхностном слое, так и в близко расположенной к нему плоскости витков обмотки. Последнее приводит к изменению магнитного потока постоянного магнитного поля через обмотку, что вследствие явления электромагнитной индукции вызывает появление в ней ЭДС, мгновенное значение которой функционально связано с характеристиками акустической волны.

Таким образом, двойное ЭМА-преобразование основано на проявлении трех эффектов взаимодействия электромагнитного поля с ОК: магнитострикционного, магнитного и электродинамического. Поэтому данное преобразование применимо только для объектов из проводящего материала (за счет проявления третьего эффекта) и (или) магнитного материала

(за счет проявления первого и второго эффектов). Следовательно, поскольку материал ОК является как магнитным, так и электропроводящим, возбуждаемые ЭМА-преобразователем акустические волны являются результатом всех трех видов взаимодействий, а ЭДС обмотки - суммой ЭДС, являющихся результатами также всех трех взаимодействий. Именно этим объясняет высокая чувствительность предложенного ФД к различным вариациям модулируемого постоянного магнитного поля. Следует отметить, что для рассматриваемых физических процессов под модуляцией понимается изменение состояния магнитной проницаемости материала конструктивных элементов МП ФК-I и ФК-II при воздействии на них физических полей.

Основные преимущества разработанного ФД обусловлены двойным μ -преобразованием за счет одновременного использования магнитомодуляционного и электромагнитно-акустического эффектов. По сравнению с традиционными системами, используемыми для решения задач дефектоскопии, к несомненным преимуществам предложенного ФД следует отнести следующие:

- отсутствие непосредственного контакта с ОК, поэтому предложенный ФД не подвержен трению и, следовательно, не изнашивается;
- расстояние от ФД до поверхности ОК может составлять до 10 мм, т.е. между поверхностью объекта контроля и поверхностью датчика могут располагаться различные среды, например, краска, пластик, грязь, воздух и другие токонепроводящие среды;
- отсутствие необходимости предварительной подготовки поверхности ОК (зачистки и шлифовки), которая необходима для обеспечения хорошего акустического контакта излучающей поверхности пьезопреобразователей с поверхностью контролируемых изделий;
- разработанный ФД не чувствителен к углу наклона его крепления на ОК, что упрощает процедуру его установки. Кроме того, за счет этого он может быть использован для дефектоскопии объектов сложной формы;
- акустическая волна формируется и распространяется непосредственно в ОК, минуя среду между ФД и ОК, за счет чего отсутствует искажение волны в этой среде. Следовательно, только сам объект контроля и содержащиеся в нем неоднородности способны изменить выходной сигнал, что повышает достоверность контроля;
- модуляция магнитной проницаемости осуществляется несколькими механизмами, обеспечивающими трансформацию энергии одного вида колебаний (электромагнитных) в энергию колебаний другого вида (упругих смещений) и наоборот. Такое комплексное воздействие и определяет высокую чувствительность предлагаемого ФД и повышает точность измерения координат дефектов.

Аналитическое описание процессов, протекающих в предложенном ФД

Новый принцип построения феррозонда для решения задач дефектоскопии основан на использовании бифакторного метода возбуждения чувствительного элемента феррозонда, осуществляющего двойное μ -преобразование за счет одновременной активации магнитомодуляционного и электромагнитно-акустического эффектов. Поэтому значительный интерес представляет получение математической модели разработанного ФД.

Исходя из сказанного выше, можно констатировать, что разработанный ФД выполняет функции индуктора (создает возбуждающее переменное и постоянное магнитные поля), функции генератора ультразвуковой волны непосредственно в исследуемом объекте, а также функции приемника ультразвуковых волн и магнитных полей и формирования выходного информационного сигнала.

За счет взаимодействия вихревых токов с индукцией магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом (это поле выполняет функции подмагничивающего поля B_0), появляются силы F_A (сила Ампера), которые направлены вдоль поверхности объекта контроля и приводят к возникновению акустических колебаний [26]:

$$F_A = i_e \times B_0 \times dl, \quad (7)$$

где i_e – вихревой ток на участке OK длиной dl .

Эти упругие силы возникают в приповерхностном слое OK , определяемом глубиной скин-слоя δ :

$$\delta = \sqrt{2/(\omega \times \mu_0 \times \mu \times \sigma)}, \quad (8)$$

где ω – круговая частота колебаний; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость; σ – электропроводность.

Для предложенного варианта конструктивного решения $\PhiД$ характерно одновременное излучение упругих волн из каждой точки на поверхности конструктивных элементов $\PhiК-I$ и $\PhiК-II$ $МП$, расположенной соответственно под $ИК_1$ и $ИК_2$. Следовательно, указанные волны распространяются во всех радиальных направлениях в поперечном сечении OK . Преимущественное возбуждение типа волн определяется взаимной ориентацией поля подмагничивания с индукцией B_0 и вихревых токов i_e , текущих по периметру OK .

В ферромагнитных материалах возникновение и распространение акустических волн обусловлено трансформацией волн на доменных границах, за счет чего возбуждаются связанные магнитоупругие колебания $q(k_n, t)$, приводящие к колебаниям намагниченности:

$$\Delta J_q(k_n, t) = \lambda \times q(k_n, t), \quad (9)$$

где k_n – волновой вектор; λ – коэффициент, зависящий от физических свойств материала OK , численное которого определяется величинами магнитоупругого тензора, волнового вектора k_n и разностью частот спиновой и упругой волн.

Учитывая, что магнитная проницаемость μ связана с магнитной восприимчивостью χ соотношением $\mu = 1 + \chi$, где $\chi = J/H$, получаем:

$$\mu = f[\zeta(t)] = \mu^*[\zeta(t)], \quad (10)$$

где $\zeta(t)$ – функция смещения структурных компонентов $\PhiК-I$ и $\PhiК-II$ магнитопровода.

Тогда с учетом соотношений (9), (10) для режима μ -преобразования за счет ЭМА-эффекта, аналогично (6), можно записать:

$$B_{AM}(t) = \mu_0 \times \mu^*[\zeta(t)] \times H_0 = \mu_0 \times \mu_{AM}^*(t) \times H_0, \quad (11)$$

где $\mu_{AM}^*[\zeta(t)]$ – функция, отражающая закон изменения магнитной проницаемости материала элементов $\PhiК-I$ и $\PhiК-II$ магнитопровода под воздействием возбуждающего акустического поля, которая при заданной амплитуде поля возбуждения может рассматриваться как функция времени $\mu_{AM}^*(t)$.

С учетом совместного модулирующего воздействия акустического и переменного магнитного полей на магнитную проницаемость материала элементов магнитопровода $\PhiК-I$ и $\PhiК-II$ запишем следующее выражение:

$$\mu^* = f[H(t); \zeta(t)]. \quad (12)$$

В соответствии с существующей параметрической теорией феррозондов с продольным возбуждением, где используется разложение функции $B(H_\Sigma)$ при $H_\Sigma = H(t) + H_0$ в ряд Тейлора по малому воздействию и с учетом того, что для рассматриваемого случая функция $\mu^* = f[H(t); \zeta(t)]$ является четной, можем записать:

$$\mu^*(t) = \mu_H \times [1 + (m_{MM} + m_{AM})] \times \cos(2\omega_p t), \quad (13)$$

где m_{AM} и m_{MM} – глубина соответственно акустической и магнитной модуляции; ω_p – циклическая частота возбуждения процессов преобразования на совпадающих частотах электромеханического и магнитного резонансов.

Глубину соответствующей модуляции магнитной проводимости можно определить по следующим формулам:

$$m_{AM} = \mu_m \times \eta_{AM} \times \zeta_m \times \mu_H^{-1}; \quad m_{MM} = \mu_m \times \eta_{MM} \times H_m \times \mu_H^{-1},$$

где η_{AM} и η_{MM} – коэффициенты соответственно акустомагнитного и магнитомодуляционного преобразований.

Из выражения (12) и (13) следует, что постоянное магнитное поле $H_0(t)$ ПМ, направленное аксиально к ферромагнитным элементам $\Phi K-I$ и $\Phi K-II$, за счет параметрической модуляции осциллирующей магнитной проницаемостью ферромагнитного материала ΦC_1 и ΦC_2 трансформируется в переменное магнитного поле с соответствующей индукцией:

$$\begin{aligned} B_I(t) &= \mu_0 \times \mu_I^*(t) \times H_0 = \mu_0 \times \mu_{IH} \times [1 + (m_{MM} + m_{AM}) \times \cos(2\omega_p t)] \times H_0; \\ B_{II}(t) &= \mu_0 \times \mu_{II}^*(t) \times H_0 = \mu_0 \times \mu_{IIn} \times [1 + (m_{MM} + m_{AM}) \times \cos(2\omega_p t)] \times H_0. \end{aligned} \quad (14)$$

Вариации магнитного поля ПМ, вызванные уже модулирующими процессами магнитной проницаемости, соответственно воздействуют на обмотки $ИК_1$ и $ИК_2$, индуцируя в них соответствующие э.д.с. $e_1(t) = -w \times d\Phi_I(t)/dt$.

Учитывая, что $e_1(t) = -w \times d\Phi_I(t)/dt$ и $e_2(t) = -w \times d\Phi_{II}(t)/dt$, можем записать:

$$e_1(t) = -s_1 \times w \times \frac{dB_I(t)}{dt} \quad \text{и} \quad e_2(t) = -s_2 \times w \times \frac{dB_{II}(t)}{dt}. \quad (15)$$

Подставляя (14) в (15), для каждой из измерительных катушек получим:

– для $ИК_1$

$$\begin{aligned} e_1(t) &= -s_1 \times w \times \mu_0 \times \left[\mu_I^*(t) \times \frac{dH_0}{dt} + H_0 \times \frac{d\mu_I^*}{dt} \right] = -s_1 \times w \times \mu_0 \times H_0 \times \frac{d\mu_I^*}{dt} = \\ &= -2 \times s_1 \times w \times \mu_0 \times \mu_{IH} \times \omega_p \times H_0 \times (m_{MM} + m_{AM}) \times \sin(2\omega_p t); \end{aligned} \quad (16)$$

– для $ИК_2$

$$\begin{aligned} e_2(t) &= -s_2 \times w \times \mu_0 \times \left[\mu_{II}^*(t) \times \frac{dH_0}{dt} + H_0(t) \times \frac{d\mu_{II}^*}{dt} \right] = -s_2 \times w \times \mu_0 \times H_0 \times \frac{d\mu_{II}^*}{dt} = \\ &= -2 \times s_2 \times w \times \mu_0 \times \mu_{IIn} \times \omega_p \times H_0 \times (m_{MM} + m_{AM}) \times \sin(2\omega_p t). \end{aligned} \quad (17)$$

Для выходных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ соответственно $ИК_1$ и $ИК_2$ можем записать следующие соотношения:

$$u_1(t) = e_1(t) + u_{K1}(t); \quad u_2(t) = e_2(t) + u_{K2}(t), \quad (18)$$

где $u_{K1}(t)$ и $u_{K2}(t)$ – электрические напряжения, возникающие на электрических обмотках $ИК_1$ и $ИК_2$ при подаче на $\Phi Д$ напряжения возбуждения $\dot{U}_0$.

Исходя из того, что $\Phi Д$ функционирует в режиме градиентомера, для регистрируемого суммарного информационного сигнала $\Phi Д$ относительно «корпуса» с учетом того, что $u_{K1}(t) = u_{K2}(t)$, можем записать:

$$u_{\Sigma}(t) = u_1(t) - u_2(t) = e_1(t) + u_{K1}(t) - e_2(t) - u_{K2} = e_1(t) - e_2(t). \quad (19)$$

Тогда, исходя из (16), (17) и (19), будем иметь:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma}(t) &= 2 \times s^* \times w \times \mu_0 \times \omega_p \times (m_{MM} + m_{AM}) \times (\mu_{IIn} - \mu_{IH}) \times H_0 \times \sin(2\omega_p t) = \\ &= 2 \times s^* \times w \times \mu_0 \times \omega_p \times (m_{MM} + m_{AM}) \times \Delta \mu_M''' \times H_0 \times \sin 2\omega_p t, \end{aligned} \quad (18)$$

где $s^* = s_1 = s_2$.

В выражении (18) четко прослеживается реализация принципа суперпозиции в виде бифакторного модулирующего воздействия от проявления двух основных физических эффектов, инициируемых соответствующими активизирующими физическими полями, что, в свою очередь, говорит о повышении эффективности μ -преобразования в целом, а также уровень вариативности этого процесса от наличия дефекта, проявляющегося в параметре $\Delta \mu_M'''$.

Для подтверждения состоятельности предлагаемых технических решений были проведены соответствующие экспериментальные исследования. При этом был использован способ относительного сравнения, основанный на сопоставлении результатов контроля, выполненного испытуемой системой НК, с результатами контроля, выполненного эталонной

системой НК, в качестве которой был выбран дефектоскоп-градиентометр ДФ-105, содержащий электронный блок и феррозондовый преобразователь ФП-4. Анализ полученных результатов показал, что испытуемая система НК по сравнению с эталонной системой обладает возможностью регистрации более мелких дефектов на больших глубинах их залегания.

Заключение

Своевременное обнаружение дефектов в металлосодержащих элементах опор ЛЭП положительно влияет на их надежность в процессе эксплуатации, что в свою очередь существенно снижает расходы, связанные с отказами и авариями ЛЭП в целом. Показано, что для решения данной проблемы широкое применение имеет магнитный неразрушающий контроль, одним из видов которого является феррозондовый метод, основанный на обнаружении и измерении с помощью магнитных полей рассеяния, возникающих в зоне дефектов.

Для решения задач дефектоскопии предложен новый принцип построения феррозондового датчика, основанный на использовании бифакторного метода возбуждения чувствительного элемента феррозонда, осуществляющего двойное μ -преобразование за счет одновременной активации магнитомодуляционного и электромагнитно-акустического эффектов. Разработана конструкция нового типа *ФД*, описан принцип его работы, рассмотрены физические процессы, протекающие в нем при реализации электромагнитно-акустического измерительного преобразования. Новый тип феррозонда для дефектоскопии обладает следующими преимуществами:

- существенное конструктивное упрощение, которое связано с тем, что $ИК_1$ и $ИК_2$ совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения и регистрация информационного сигнала;
- повышенная помехозащищенность, за счет использования $ИК_1$ и $ИК_2$ в качестве плечевых элементов емкостно-индуктивного измерительного моста с разностным сигналом его измерительной диагонали (компенсация синфазных составляющих помехи и последствий температурного дрейфа);
- повышенная чувствительность без ухудшения точности преобразования, которая обеспечивается путем использования набора свойств материала конструктивных элементов *ФК-I* и *ФК-II МП*, проявляемых в виде различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями;
- пониженное энергопотребление.

Предложенный *ФД* легко использовать для мониторинга состояния стальных и железосодержащих элементов опор ЛЭП непосредственно в полевых условиях, поскольку для проведения контрольных операций его достаточно просто поднести к *ОК* и перемещать вдоль контролируемой зоны, фиксируя в ней наличие дефектов или структурной неоднородности.

Разработанный метод дефектоскопии и датчик для его реализации могут быть использованы наряду с контролем опор ЛЭП для контроля других металлических элементов и конструкций ЛЭП при их сооружении, периодических технических освидетельствованиях, при капитальном ремонте, в частности, для контроля металлических и сталеалюминиевых проводов или стальных сердечников самонесущих проводов в процессе их изготовления.

Литература

1. Джылкычиева Ж.Т., Бекибаев И.Ж. Оценка энергетического сектора Кыргызской Республики // Известия вузов Кыргызстана. – 2023. – № 6. – С. 216–219.
2. Гунгер Ю.Р., Чернев В.Т. Диагностика опор и фундаментов воздушных линий электропередачи. Современные методы оценки // Новости электротехники. – 2006. – № 2. – С. 134–136.

3. Глухов Д. А. Методика оценки приоритетности ремонта ЛЭП на основе риск-ориентированного анализа с учетом ремонтпригодности // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2019. – № 12. – С. 27–34.
4. Кабашов, В.Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6-10 кВ / В.Ю. Кабашов // *Инновационная наука.* – 2017. – №04-3. – С. 70–73.
5. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. – Новосибирск: Наука, 2009. – 135 с.
6. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. – М.: Машиностроение, 2003. – 487 с.
7. Paipetis A. S., Matikas T. E., Aggelis D. G., Van Hemelrijck D. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing* V. London: CRC Press. – 2012. – 526 p.
8. Mao X., Zhao Y., Xiao T. Review of the development of metal non-destructive testing and imaging technology, 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, – 2018. – pp. 926-929, doi: 10.1109/ITOEC.2018.8740475.
9. Афанасьев В. Б., Чернова Н. В. Современные методы неразрушающего контроля // *Успехи современного естествознания.* – 2011. – № 7. – С. 73–74.
10. Петров О.Н., Сокольников А. Н., Верещагин В. И., Агровиченко Д. В. Методы неразрушающего контроля. – Красноярск: СФУ, 2021. – 132 с.
11. Бобров А.Л., Лесных Е.В. Основы магнитного неразрушающего контроля. – Новосибирск: Изд-во СГУПС. – 2018. – 108 с.
12. Ficili F. *Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques.* – LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 140 p.
13. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
14. Ripka, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers.* – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.
15. Miroshnikov, V.V., Petruchshenko, T.V., Dyadichev, V.V. Multiunit Ferroprobe Converters as an Effective Method of the Nondestructing Magnetic Inspection. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. – 2023. – pp. 259–268. DOI 10.1007/978-3-031-14125-6_26.
16. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Гунина М.Г. Система оперативного контроля технического состояния электрических кабелей // *Проблемы автоматизации и управления.* – 2018. – № 1 (34). – С. 55–63.
17. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshin R.R. Two-Axis Fluxgate Magnetometer with a New Principle of Excitation // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* – 2020. – Pp. 693 – 698. DOI 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208228.
18. Bochkarev I. V., Bryakin I. V., Khrumshin V. R. Ferroprobe Magnetometer with Preset Excitation Field Induction Mode. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2021. – pp. 31–36. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559463.
19. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Измерительный датчик для систем неразрушающего контроля стальных канатов // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2017. – № 2 (35). – С. 49–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54).
20. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
21. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С., Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля // *Авиационные материалы и технологии.* – 2013, № 1 (26). – С. 64–69.
22. Шавров В. Г., Бучельников В. Д., Бычков И. В. Связанные волны в магнетиках: монография. – Москва: Физматлит, 2019. – 476 с.
23. Васильев А. Н., Бучельников В. Д., Гуревич С. Ю. Электромагнитное возбуждение звука в металлах. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.

24. Бычков И. В., Кузьмин Д. А., Бучельников В. Д., Шавров В. Г. Влияние взаимодействия подсистем на динамические свойства магнетиков. – М.: Физматлит, 2016. – 176 с.
25. Прокофьев К.В., Шульгинов А.А., Гуревич С.Ю. Структура электромагнитного поля, наведенного над поверхностью ферромагнитного полупространства при падении сферического фронта акустической волны // Вестник ЮУрГУ. – 2002. – № 3. – С. 50–55.
26. Faria J. A. B. *Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*. – John Wiley & Sons, Ltd. 2008. – 420 p.