

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.179.14: 621.315.23

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-16-28



МУЛЬТИПЛИЦИРОВАННЫЙ СПОСОБ ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ

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

¹Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

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

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Цель. Разработать и теоретически обосновать новый способ индукционного зондирования, обеспечивающий повышенную чувствительность поиска различных электропроводящих подповерхностных объектов, например подземных кабельных линий и трубопроводов. Разработать установку для реализации предложенного способа. Методы. При решении поставленных задач использован метод электромагнитного зондирования, заключающийся в генерировании переменного электромагнитного поля, которым сканируют исследуемую область, с последующей фиксацией наличия подповерхностных объектов путем приема отраженного от него сигнала. Результаты. В статье разработан новый мультилицированный способ поиска подповерхностных объектов, особенностью которого является то, что при помощи излучающей рамочной антенны не только возбуждают первичное магнитное поле, но и одновременно контролируют изменение электрических параметров этой антенны, вызванные переизлученным полем от подповерхностных объектов. Предлагается использовать два асимметричных измерительных канала. В качестве датчика первого измерительного канала используется рамочная антenna, причем в этом канале создается резонансный режим возбуждения, а в качестве датчика второго измерительного канала используется приемная ферритовая магнитная антenna, для которой создан режим магнитного усилителя. Приведено теоретическое обоснование нового способа. Разработана структурная блок-схема двухканальной индукционной установки для дистанционного зондирования, описана процедура определения глубины залегания подповерхностного объекта и его идентификации. Заключение. Разработанный мультилицированный способ индукционного зондирования обеспечивает высокую эффективность поиска и идентификации различных подповерхностных объектов. Он обеспечивает повышенную чувствительность и точность зондирования, а также снижение в несколько раз порога чувствительности магнитной антены, выполняющей функции измерительного преобразователя.

Ключевые слова: индукционное зондирование, подповерхностный объект, зондирующая установка, излучающая рамочная антenna, резонансный режим возбуждения, приемная ферритовая магнитная антenna, измерительный канал, магнитный усилитель.

© Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р., 2021

Для цитирования

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Мультилицированный способ индукционного зондирования для поиска подземных электропроводящих объектов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 16–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-16-28>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MULTIPLICATED METHOD OF INDUCTION SOUNDING TO SEARCH FOR UNDERGROUND ELECTRICALLY CONDUCTIVE OBJECTS

Bryakin I.V.¹, Bochkarev I.V.², Kramshin V.R.³

¹Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

²Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan

³Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Purpose. The aim of this paper is to develop and theoretically substantiate a new way of induction sounding, providing an increased sensitivity of the search for various electrically conductive subsurface objects (SO), for example underground cable lines and pipelines, as well as to develop an installation to implement the proposed method. **Methods.** When solving the tasks, the authors have used the electromagnetic sounding method, which consists in generating an alternating electromagnetic field, which scans the area under study, followed by the fixation of the SO presence by receiving the signal reflected from it. **Results.** The paper presents a new multipliclicated method for searching SO, whose feature is that a radiating frame antenna is used not only to excite the primary magnetic field, but also simultaneously control the change in the electrical parameters of this antenna caused by the reradiated field from the SO. It has been proposed to use two asymmetric measuring channels (MC). The first MC sensor uses a frame antenna, and the resonant excitation mode is created in this channel, and the receiving ferrite magnetic antenna is used as the second MC sensor, which creates a magnetic amplifier mode. The paper contains a theoretical substantiation of the new method. A structural block diagram of a two-channel induction installation for remote sensing has been developed, a procedure for determining the depth of the SO and its identification has been described. **Conclusion.** The developed multipliclicated method of induction sounding provides high search efficiency and identification of various SO. It provides increased sensitivity and accuracy of sounding, as well as a decrease in a magnetic antenna sensitivity threshold by several times, performing the function of the measuring transducer.

Keywords: induction sounding, subsurface object, sounding installation, emitting frame antenna, resonant excitation mode, receiving ferrite magnetic antenna, measuring channel, magnetic amplifier.

For citation

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kramshin V.R. Multiplicated Method of Induction Sounding to Search for Underground Electrically Conductive Objects. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 16–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-16-28>

Введение

В настоящее время на практике для обнаружения подповерхностных объектов (ПО) в виде подземных инженерных сооружений (кабельных и телефонных линий, трубопроводов и т.п.), а также различного рода подземных электропроводящих объектов и геоэлектрических неоднородностей верхних слоев земной коры используется различная зондирующая аппаратура [1–3], которая реализует различные способы зондирования. Эффективность этой аппаратуры в значительной мере зависит от способов создания зондирующих сигналов, получения и обработки измерительной информации, а также от конструктивных особенностей индукционных установок (ИУ), используемых для их реализации [4–7]. При этом, несмотря на многообразие известных способов дистанционного зондирования, вопросы расширения их функциональных возможно-

стей, а также повышение чувствительности и точности по-прежнему остаются весьма актуальными и востребованными [8–10].

Для исследований был выбран один из наиболее распространённых и эффективных подходов к зондированию и поиску металлических обесточенных ПО – электромагнитное зондирование, основанное на том, что генерируют переменное зондирующее электромагнитное поле, которым сканируют исследуемую область, а наличие в ней ПО фиксируют путем приема отраженного от него сигнала.

Теоретическое обоснование нового мультилицированного способа индукционного зондирования

Подробный анализ известных способов зондирования и конструктивных модификаций ИУ показал, что для улучшения их эксплуатацион-

ных характеристик целесообразно реализовывать два эффекта [11]:

- применять вариант с нулевым первичным полем, то есть за счет особого взаимного расположения генераторной и приемной катушек обеспечивать геометрическую компенсацию первичного поля, а также реализовать компенсацию ЭДС, индуцируемых в приемных катушках внешними электромагнитными помехами;
- использовать методы усиления магнитного потока.

На базе проведенных исследований был разработан новый мультилинированный способ индукционного зондирования, позволяющий с высокой точностью осуществлять поиск и идентификацию металлических подповерхностных объектов.

Сущность этого способа заключается в том, что в окружающем пространстве посредством излучающей рамочной антенны, питаемой гармоническим сигналом, возбуждают первичное электромагнитное поле и этим полем наводят в ПО вихревые токи, создающие вторичное (переизлученное) электромагнитное поле. При этом рамочная антenna является не только источником первичного электромагнитного поля, но и одновременно приемником вторичного электромагнитного поля. Кроме того, в качестве дополнительного датчика регистрации вторичного магнитного поля применяется ферритовая магнитная антenna (МА) с геометрической компенсацией первичного поля [12, 13].

Указанные особенности предлагаемого способа позволяют при зондировании реализовать метод инвариантных измерений. Для этого используют два независимых измерительных канала (ИК) ИК₁ и ИК₂ [14], каждый из которых находится под воздействием вторичного поля. Первый ИК₁ образуют путем использования первичной рамочной антенны, причем для повышения чувствительности в этом канале создают резонансный режим возбуждения, а основой второго ИК₂ является приемная ферритовая магнитная антenna. В каждом из этих ИК реализуют различные физические принципы, обеспечивая тем самым линейную независимость их статических функций преобразования [15–17]. Это обеспечивает возможность управления режимами функционирования второго ИК₂ сигналами первого ИК₁. При этом для приемной ферритовой магнитной антены создают режим магнитного усилителя. Это существенно снижает погрешность реального процесса преобразования входной величины во втором ИК₂ и обес-

печивает заметное снижение (в несколько раз) порога чувствительности МА как измерительного преобразователя.

Рассмотрим подробно все основные процедуры, выполняемые при создании зондирующего поля и контроле переизлученного поля от ПО, а также методологию обработки измерительной информации.

Работа первого измерительного канала ИК₁. Основу первого ИК₁ составляет рамочная антenna (РА). При помощи этой антены в предлагаемом способе, как уже говорилось, выполняют две операции:

- создают в однородном окружающем пространстве первичное непрерывное электромагнитное поле, для чего на РА подают от возбуждающего генератора звуковых частот непрерывный синусоидальный сигнал рабочей частоты $U_0(t) = U_m \cos \omega t$. Этим полем наводят в ПО вихревые токи, создающие вторичное электромагнитное поле, которое намагничивает окружающую среду;
- улавливают влияние вторичного поля на первичное магнитное поле, которое изменяет электрические параметры РА.

Схема взаимодействия РА 1 с ПО 3 показана на **рис. 1**. Для повышения чувствительности индукционного зондирования в канале ИК₁ создают резонансный режим возбуждения посредством включения последовательно с РА конденсатора C_1 .

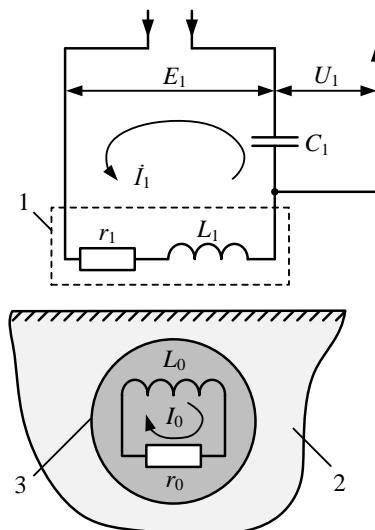


Рис. 1. Схема индукционного взаимодействия рамочной антенны с подповерхностным объектом:
1 – рамочная антена; 2 – вмещающая среда; 3 – подповерхностный объект

Fig. 1. Scheme of induction interaction of a frame antenna with the subsurface object:
1 is a frame antenna; 2 is background medium;
3 is the subsurface object

Под действием первичного переменного электромагнитного поля, возбужденного током \dot{I}_1 , в контуре РА « $L_1 r_1$ » будет наводиться ЭДС \dot{E}_1 . Если во вмещающей среде 2 ПО 3 отсутствует, то эта ЭДС описывается выражением

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]. \quad (1)$$

В этом выражении принято, что внутреннее сопротивление возбуждающего генератора $r_{\text{вн}} = 0$.

В этом случае напряжение на индуктивности будет равно

$$\dot{U}_L = \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1). \quad (2)$$

При появлении во вмещающей среде 2 электропроводящего ПО 3, имеющим индуктивность L_0 и сопротивление r_0 , в его электрическом контуре « $L_0 r_0$ » под действием первичного переменного электромагнитного поля наведется ЭДС и по этому контуру потечет ток \dot{I}_0 , который возбудит вторичное (отраженное) магнитное поле. Это приведет к тому, что контур « $L_1 r_1$ » расстроится, что, в свою очередь, приводит к изменению напряжения \dot{U}_1 на конденсаторе C_1 .

Таким образом, при наличии ПО 3 между контурами « $L_1 C_1$ » и « $L_0 r_0$ » появится взаимосвязь, характеризующаяся коэффициентом взаимоиндукции M_1 . В этом случае для этих взаимосвязанных контуров можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1^* \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] + j\omega M_1 \dot{I}_0; \\ j\omega M_1 \dot{I}_1^* - (r_0 + j\omega L_0) \dot{I}_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку $r_{\text{вн}} = 0$, то величина ЭДС возбуждающего генератора в обоих случаях не изменится, но при наличии ПО ток контура РА изменится и будет равным \dot{I}_1^* .

Решив второе уравнение системы (3) относительно \dot{I}_0 и подставляя результат в первое уравнение, получим

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = \dot{I}_1^* & \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + \right. \\ & \left. + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$.

Таким образом, вследствие взаимодействия контуров « $L_1 C_1$ » и « $L_0 r_0$ » величины активного r_1 и реактивного x_L сопротивления контура РА изменились соответственно на

$$\Delta r_1 = \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0; \quad x_L = -j \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0. \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (2) и (5), при наличии ПО напряжение на индуктивности L_1 станет равным

$$\dot{U}_L^* = \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right]. \quad (6)$$

Тогда приращение напряжения на индуктивности L_1 будет равно

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_L^* = \dot{U}_L^* - \dot{U}_L &= \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + \right. \\ & \left. + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right] - \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Учтем, что ток в контуре РА « $L_1 r_1$ » при отсутствии и при наличии ПО соответственно равен

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 / r_1; \quad \dot{I}_1^* = \dot{E}_1 / \dot{Z}_1, \quad (8)$$

где

$$\dot{Z}_1 = \left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right).$$

Введем обозначение $k^2 = \omega^2 M_1^2 / Z_0^2$ и принимаем в качестве допущения, что $M_1 \ll 1$ и $\omega L_1 - 1/(\omega C_1) = 0$. Тогда выражение (4) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_L^* = \dot{E}_1 & \left[\frac{\left(r_1 + k^2 r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - k^2 \omega L_0 \right)}{\left(r_1 + k^2 r_0 \right) + j k^2 \omega L_0} - \right. \\ & \left. - \frac{\left(r_1 + j\omega L_1 \right)}{r_1} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Добротность Q_1 контура РА равна $\omega L_1 / r_1 = Q_1$.

Тогда, с учетом сказанного, выражение (9) примет следующий вид:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\dot{E}_1 \frac{r_1}{\left(r_1 + k^2 r_0 \right)^2} k^2 Q_1 (\omega L_0 + j r_0). \quad (10)$$

Модуль данного приращения напряжения равен

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{U}_L^*| &= \frac{\dot{E}_1}{r_1} \frac{\omega^2 M_1^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} \cdot Q_1 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} = \\ &= \frac{\dot{E}_1}{r_1} \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0} Q_1, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\frac{r_1}{(r_1 + k^2 r_0)^2} \approx \frac{1}{r_1}$; $M_1 = M_0 e^{-\frac{3h}{R_\odot}}$, h – расстояние между РА и ПО; M_0 – коэффициент взаимной индукции РА и ее зеркального отображения при $h = h_{\min}$; R_\odot – эквивалентный радиус РА.

В соответствии с выражением (11) можно считать, что чувствительность колебательного контура в резонансном режиме возросла в Q_1 раз. Кроме того, конденсатор C_1 дополнительно выполняет функции балластного реактивного сопротивления, что позволяет в итоге существенно уменьшить активное сопротивление РА r_1 и повысить тем самым ее добротность Q_1 .

Анализ полученных выражений показывает, что при наличии в первом измерительном канале колебательного контура $L_1 C_1$, который будет настроен на резонансную рабочую частоту f_p , обеспечивается контроль как глубины h залегания ПО, так и изменения электропроводности верхних слоев вмещающей среды, обусловленных наличием ПО.

Обобщая вышесказанное, выражение (11) можно трансформировать к виду

$$U_{IK_1} = K_1 \cdot U_L = F_1(\sigma, h), \quad (12)$$

где K_1 – коэффициент преобразования измерительного канала ИК₁.

Фактически вторичное (переизлученное) магнитное поле H_2 представляет собой некоторый вариант масштабированного поляризованного первичного магнитного поля H_1 , что в итоге и предопределяет наличие во вторичном магнитном поле H_2 наряду с вертикальной магнитной компонентой H_z еще и горизонтальной магнитной компоненты H_x (рис. 2):

$$H_2 = \sqrt{H_x^2 + H_z^2}. \quad (13)$$

Учитывая, что $U_{IK_1} = F(H_z)$ и $U_{IK_2} = F(H_x)$, можем констатировать справедливость следующих логических утверждений:

$$(U_{IK_1}/U_{IK_2}) = (H_z/H_x) = \Delta. \quad (14)$$

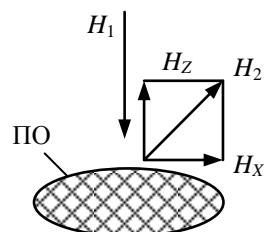


Рис. 2. Распределение магнитных полей

при наличии подповерхностного объекта

Fig. 2. Distribution of magnetic fields in the presence of a subsurface object

В свою очередь, наличие во вмещающей среде ПО, резко контрастирующего на ее фоне своими физическими свойствами, приведет к соответствующему перераспределению существующего соотношения Δ между компонентами H_z и H_x в составе вторичного магнитного поля H_2 , то есть в общем случае величину Δ можно считать величиной вариативной, которая при четко выраженных поляризующих свойствах ПО может принять некоторое пороговое значение Δ_p .

Таким образом, можно утверждать, что в случае появления устойчивой локальной неоднородности в виде ПО во вмещающей среде Δ примет некоторое пороговое значение Δ_p , которое является фактором, надежно определяющим наличие инородного ПО во вмещающей среде. В этом случае будет фиксироваться заметное увеличение компоненты H_x и соответствующее изменение H_z , то есть существенное уменьшение Δ до условного порогового значения Δ_p .

Данное обстоятельство говорит о том, что в этом случае есть определенный смысл использовать режим магнитного усилителя (МУ) для МА в момент реализации следующего условия:

$$\Delta \leq \Delta_p. \quad (15)$$

Работа второго измерительного канала ИК₂. Основу второго ИК₂ составляет приемная ферритовая магнитная антенна МА в виде двух приемных катушек, расположенных на ферритовом стержне. В этом способе зондирования предлагается перевести МА в режим магнитного усилителя [18].

Рассмотрим условия, при которых МА можно рассматривать в качестве МУ (рис. 3).

В случае функционирования МА в режиме МУ ее ферритовый стержень 2 фактически является магнитопроводом МУ, а ее измерительная обмотка используется в качестве входной и вы-

ходной обмоток МУ. Для рассматриваемого случая последовательно с этой обмоткой со стороны источника управляющего входного сигнала $\bar{U}_{\text{вх}}$ включен дроссель в виде индуктивности L , имеющий небольшое активное сопротивление для сигнала постоянного тока, но представляющий собой большое реактивное сопротивление для переменной ЭДС, индуцируемой во входной обмотке МУ (измерительная обмотка МА) измеряемым переменным магнитным полем \tilde{H}_x и являющейся выходным сигналом $\tilde{U}_{\text{вых}}$ МУ. В рассматриваемой схеме МУ измеряемое магнитное поле \tilde{H}_x дополнительно выполняет функции управляющего (возбуждающего) магнитного поля.

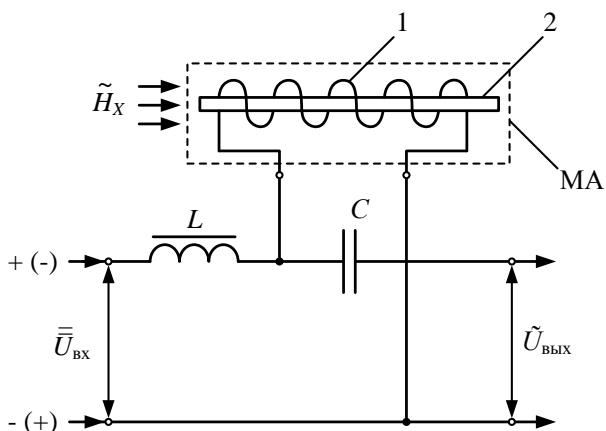


Рис. 3. Схема магнитного усилителя напряжения с выходом на удвоенной частоте

Fig. 3 Magnetic voltage amplifier circuit with double-frequency output

При подаче на измерительную обмотку МА, выполняющую в данном случае функцию входной обмотки МУ, постоянного опорного напряжения $\bar{U}_{\text{вх}}$ в ней возникнет постоянный ток \bar{I} , который создаст в магнитопроводе МУ постоянное подмагничивающее магнитное поле \bar{H}_{Π} , которое вследствие нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитного стержня вызовет соответствующие изменения его нормальной магнитной проницаемости $\mu_h(\bar{H}_{\Pi})$ и магнитного сопротивления:

$$Z_M = \frac{l}{\mu_h(\bar{H}_{\Pi}) \cdot S}. \quad (16)$$

Таким образом, в МУ фактически реализуется режим одновременного намагничивания магнито-

проводов МУ переменным (измеряемым) и постоянным (подмагничивающим) магнитными полями.

Все электродинамические процессы, определяющие особенности режима функционирования рассматриваемого МУ, представлены на графике основной кривой намагничивания материала магнитопровода МУ (рис. 4).

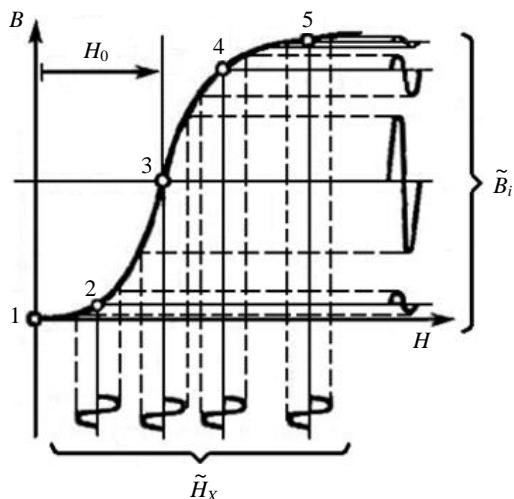


Рис. 4. Основная кривая намагничивания магнитопровода магнитного усилителя

Fig. 4. Basic magnetic amplifier magnetization B-H curve

Из рис. 4 видно, что при изменении \bar{H} в диапазоне $\inf \bar{H} \leq \bar{H} \leq \sup \bar{H}$ материал сердечника выходит из состояния насыщения и рабочая точка магнитного усилителя перемещается из точки 5 в область точки 3, в которой нормальная (эффективная) магнитная проницаемость материала магнитопровода МУ достигает своего максимального значения, то есть $\mu(H_0) = \mu_{\max}$.

Из анализа характеристики МУ вход-выход, представленной на рис. 5, следует, что при $\bar{I} = I_0$ выходной сигнал $\tilde{U}_{\text{вых}}$ МУ в виде уже существенно усиленной переменной ЭДС подается в измерительный канал через конденсатор C , препятствующий проникновению напряжения опорного сигнала $\bar{U}_{\text{вх}}$ в этот измерительный канал.

Таким образом, если МА использовать в режиме МУ, то на выходе катушки индуктивности для вторичного (переизлученного) магнитного поля H_2 с горизонтальной составляющей H_x , меняющейся по гармоническому закону с циклической частотой ω_p и являющейся функцией физических параметров σ и h , напряжение U_{MA} будет определяться следующим соотношением:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{MA}} &= -j \cdot \omega \cdot \mu_{\text{H}} \cdot \mu_0 \cdot w \cdot \dot{H}_x \cdot K_{\mu} \cdot S = \\ &= -j \cdot \omega \cdot \mu_{\text{max}} \cdot \mu_0 \cdot w \cdot \dot{H}_x \cdot S,\end{aligned}\quad (17)$$

где j – мнимая единица; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; w – количество витков в катушке индуктивности МА 2; $S = \pi d^2/4$ – площадь сечения сердечника МА; d – диаметр сердечника МА 2; $\dot{H}_x = F(\sigma, h)$ – напряженность горизонтальной магнитной компоненты вторичного электромагнитного поля; σ и h – величины соответственно удельной электрической проводимости и глубины залегания ПО; $\mu_{\text{max}} = \mu_H K_{\mu}$ – максимально возможная магнитная проницаемость материала сердечника; K_{μ} – коэффициент мультилиплицирования, характеризующий уровень повышения чувствительности МУ для конкретного материала сердечника МА за счет постоянного подмагничивающего поля \bar{H}_{Π} .

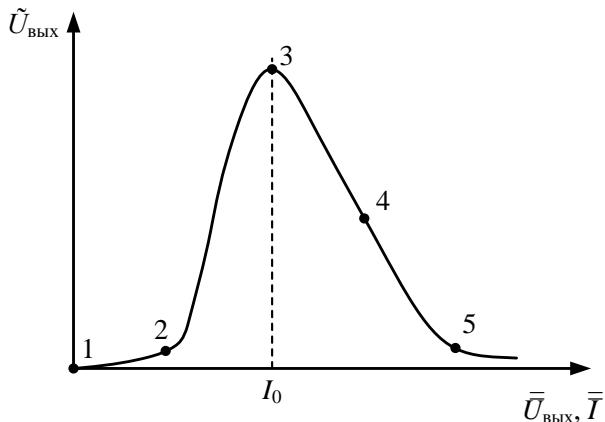


Рис. 5. Характеристика магнитного усилителя
вход-выход

Fig. 5. Magnetic amplifier characteristics: Input-output

Из уравнения (17) следует, что функционирование МА в режиме МУ при соответствующих условиях ($H_{\Pi} = H_0$) существенно снижает погрешность реального процесса преобразования входной величины H_x измерительным каналом ИК₂ и обеспечивает максимальную чувствительность самой МА.

Переключение традиционного режима МА в режим МУ может осуществляться посредством специального бинарного сигнала «включение режима» $U_{\text{BP}}(t)$, предназначенного и формируемого для активации подмагничивающего поля $H_{\Pi} = H_0$, в соответствии с условиями:

$$U_{\text{BP}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta \leq \Delta_P; \\ 0, & \text{при } \Delta > \Delta_P. \end{cases} \quad (18)$$

Обобщая, можно констатировать, что первичное магнитное поле H_1 возбуждает в проводящем ПО вихревой электрический ток, который, в свою очередь, создает вторичное магнитное поле H_2 , горизонтальная компонента которого H_x воздействует на функционирующую в режиме МУ ферритовую МА, и индуцирует в ее двух приемных катушках соответствующие ЭДС, сумма которых в соответствии с (12) в результате последующих измерительных преобразований в ИК₂ трансформируется к виду

$$U_{\text{ИК}_2} = K_2 \cdot \dot{U}_{\text{MA}} = F_2(\mu_{\text{max}}, \sigma, h), \quad (19)$$

где K_2 – коэффициент преобразования измерительного канала ИК₂.

Очевидно, что внутри диапазона измерения связь между сигналами на выходе и входе МА определяется функциональной зависимостью $U_{\text{MA}} = f(H_x)$, которая является статической характеристикой МА (рис. 6, а).

Введем величину δ , определяемую соотношением

$$\delta = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U_{\text{MA}}}{\Delta H_x} \right) = \frac{dU_{\text{MA}}}{dH_x}.$$

Очевидно, что ее можно считать чувствительностью МА, а применительно к графической интерпретации – крутизной характеристики (рис. 6, б).

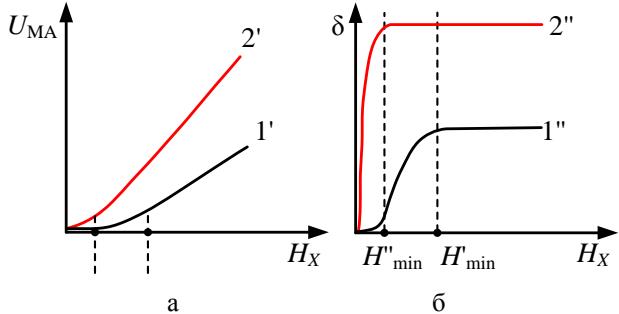


Рис. 6. Графическая интерпретация основных
характеристик магнитной антенны: а и б –
соответственно статическая характеристика
и крутизна характеристики

Fig. 6. Diagramming of the basic characteristics
of the magnetic antenna: a and б are static
characteristics and steepness
of the characteristics, respectively

На рис. 6 графики 1' и 1'' соответствуют нормальному режиму работы МА, зависимости 2' и 2'' соответствуют функционированию МА в режиме МУ, а величины H'_{\min} и H''_{\min} являются

порогами чувствительности МА соответственно при ее нормальном режиме работы и в режиме МУ. Из анализа графиков на рис. 6 следует, что именно за счет введения коэффициента мультиплицирования K_{μ} , обеспечивающего необходимый тренд варьирования магнитной проницаемости, появилась реальная возможность заметного снижения (в несколько раз) порога чувствительности датчика электромагнитного поля в виде МА.

Обобщая, можно констатировать, что использование двух независимых измерительных каналов ИК₁ и ИК₂, резонансного режима возбуждения РА, а также перевод МА в режим магнитного усилителя обеспечивают разработанному способу значительное повышение чувствительности и точности подповерхностного зондирования.

Разработка индукционной установки для реализации предложенного способа подповерхностного зондирования

На базе проведенных исследований была разработана структурная блок-схема индукционной установки, реализующая предложенный мультилизированный способ индукционного зондирования для поиска металлических ПО (рис. 7). ИУ состоит из следующих функциональных блоков: 1 – индукционный зонд (ИЗ); 5 – разделительный фильтр (РФ); 6 – генератор

электрических сигналов звуковых частот; 7 – формирователь опорных напряжений; ИК₁ и ИК₂ – соответственно первый и второй измерительные каналы; 10 – формирователь напряжения задания режима МУ; 16 – коммутатор; 17 – вычислительный блок (ВБ).

Индукционный зонд 1 содержит генераторную рамочную антенну РА, а также приемную магнитную антенну МА, состоящую из ферритового сердечника 2 и двух идентичных приемных катушек 3, 4. По отношению к приемным катушкам 3 и 4 рамочная антенна имеет ортогональное пространственное расположение. Тем самым осуществляется геометрическая компенсация первичного поля. Последовательно с РА 2 подключен конденсатор C_1 , который образует с ней резонансный контур. Катушки 3 и 4 имеют дифференциальное согласное включение. При наличии внешних синфазных электромагнитных помех, которые будут наводить в катушках 3 и 4 ЭДС с одинаковыми амплитудами и фазами, указанное включение катушек 3 и 4 будет обеспечивать полную взаимную компенсацию этих ЭДС. Первый ИК₁ содержит синхронный детектор 8 и блок вторичной обработки сигнала 9. В свою очередь, в состав ИК₂ входят буферные усилители 11 и 12, разностный усилитель 13, синхронный детектор 14 блок вторичной обработки сигнала 15.

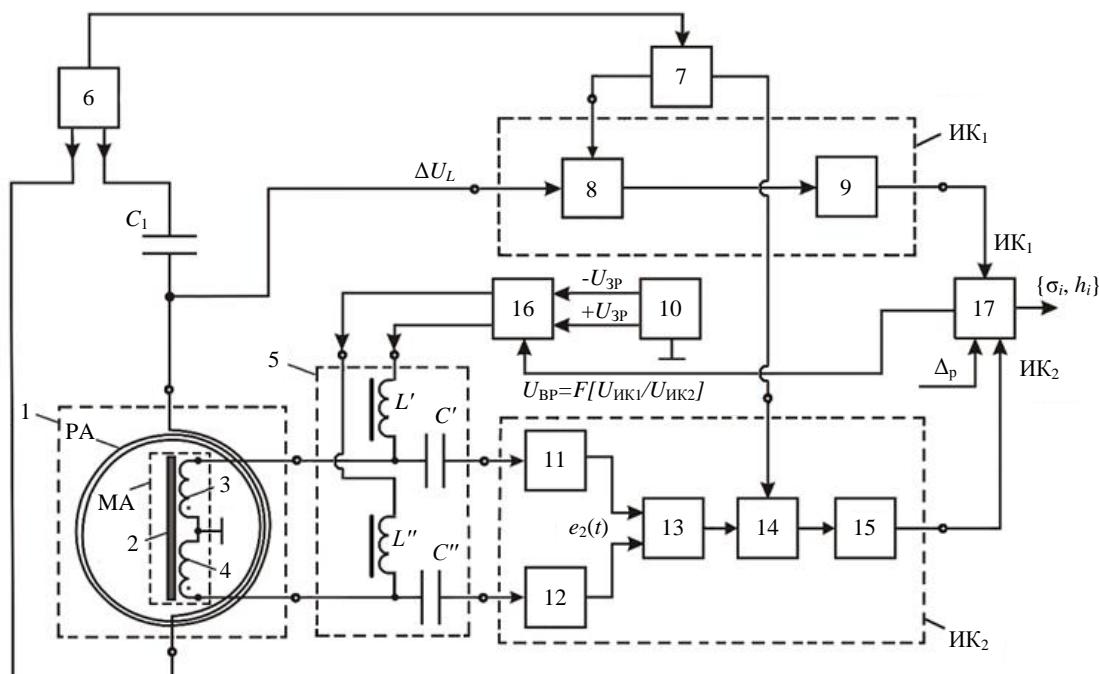


Рис. 7. Структурная блок-схема индукционной установки
Fig. 7. A schematic block diagram of the induction installation

Предлагаемая установка работает следующим образом. При подаче на РА 2 сигнала рабочей частоты от генератора звуковых частот 6 она возбуждают в окружающем пространстве первичное электромагнитное поле. Поскольку РА и МА имеют взаимное ортогональное расположение, а катушки 3 и 4 включены дифференциально и согласно, то при отсутствии ПО в исследуемой области суммарная ЭДС на выходе ФА будет равняться нулю. Таким образом, за счет описанного расположения и подключения катушек РА и МА обеспечивается повышенная помехоустойчивость ИЗ в целом.

При наличии электропроводящего ПО в нем полем РА наводится ЭДС, появляются вихревые токи, которые создают вторичное магнитное поле. Это поле будет восприниматься катушками 3 и 4. Таким образом, при наличии во вмещающей среде ПО появляется горизонтальная магнитная составляющая вторичного магнитного поля, что приводит к нарушению начальной компенсации. За счет этого на выходе МА появляются относительно средней точки катушек 3 и 4 соответствующие напряжения, которые через реактивные элементы (C' и C'') РФ 5 поступают на входы буферных усилителей 11 и 12. Сигналы с выходов буферных усилителей 11 и 12 подаются на вход разностного усилителя 13. Усиленный разностным усилителем 13 сигнал подается на информационный вход синхронного детектора 14, на опорный вход которого подается сигнал с выхода формирователя опорных напряжений 7, на вход которого подается непосредственно синусоидальное напряжение с выхода генератора 6. Выходной сигнал синхронного детектора 14 подается на блок вторичной обработки информации 15, где вычисляются параметры этого сигнала, и информация о них передается на соответствующий вход ВБ 17.

Первичное и вторичное магнитные поля, созданные соответственно РА и ПО, накладываются друг на друга. Это результирующее поле воздействует на РА и ее исходные электрические параметры изменяются. За счет этого на входе блока 9 появляется сигнал девиации, который описывается уравнением (11). Этот сигнал подается на информационный вход синхронного детектора 8, на опорный вход которого подается опорное напряжение с соответствующего выхода формирователя опорных напряжений 7. В свою очередь, сигнал с выхода синхронного детектора 8 поступает на вход блока вторичной обработки сигнала 9, который определяет па-

метры сигнала девиации и информацию о них передает на соответствующий информационный вход ВБ 17.

Блок 17, используя полученную информацию с выходов блоков 9 и 15, алгоритмически определяет все необходимые параметры ПО, то есть h и σ . Кроме того, блоком 17 дополнительно осуществляется процесс вычисления отношения $(U_{ИК_1} / U_{ИК_2}) = \Delta$, значение которого регулярно сопоставляется этим же блоком с заданным пороговым значением Δ_p . При выполнении условия (15) на управляющем выходе блока 17 формируется специальный бинарный сигнал «включение режима» $U_{BP}(t)$ (18), поступающий на управляющий вход коммутатора 16.

В свою очередь, блок 10 осуществляет формирование двухполарных напряжений задания режимов ($-U_{3P}$ и $+U_{3P}$), которые поступают на информационные входы коммутатора 16. При активации коммутатора 16 сигналом $U_{BP}(t)$ напряжения задания режимов с его информационных выходов возбуждают через соответствующие реактивные элементы (L' и L'') РФ 5 соответствующие токи подмагничивания катушек 3 и 4 МА. При этом обеспечиваются необходимые фазировки и амплитуды этих токов, а также надежная развязка выходов блока 16 от информационных переменных сигналов с катушек 3 и 4. Кроме того, через соответствующие реактивные элементы (C' и C'') РФ 5 осуществляется разделение входов буферных усилителей 11 и 12 от постоянных электрических сигналов с блока 16. Особенности функционирования блоков 5 и 16 фактически обеспечивают режим МУ для МА при наличии ПО во вмещающей среде, создавая тем самым условия возникновения эффекта управляемой «магнитной линзы».

Если задать заранее высокую чувствительность ИК₂ посредством аппаратных средств, непосредственно образующих данный измерительный канал, то это приведет к возникновению ложных срабатываний ИУ и появлению состояния информационной неопределенности при работе ВБ 17. Таким образом, использование способа повышения чувствительности ИК₂ за счет изменения физических свойств чувствительного элемента МА (датчика магнитного поля), непосредственно участвующего в первичном измерительном преобразовании информационного сигнала, выводит решение проблемы поиска различных электропроводящих ПО на качественно иной уровень.

Исходя из уравнений (7) и (14), можно составить следующую систему уравнений измерений для ИК₁ и ИК₂ при функционировании МА в режиме МУ [14]:

$$\begin{cases} U_{\text{ИК}_1} = a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot h; \\ U_{\text{ИК}_2} = a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot h, \end{cases} \quad (20)$$

где a_1, b_1 и a_2, b_2 – коэффициенты линейно независимых статических функций преобразования соответственно ИК₁ и ИК₂.

Систему алгебраических уравнений измерений (20) перепишем в виде общих уравнений двух плоскостей областей возможных значений контролируемых параметров (σ и h) ПО в пространстве прямоугольной системы координат $O\sigma h z$ (рис. 8):

$$\begin{cases} a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot h + c_1 \cdot z = 0; \\ a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot h + c_2 \cdot z = 0, \end{cases} \quad (21)$$

$$(22)$$

где c_1 и c_2 – масштабные коэффициенты; $c_1 \cdot z = U_{\text{ИК}_1}$; $c_2 \cdot z = U_{\text{ИК}_2}$; a_1 и b_1 , a_2 и b_2 – угловые коэффициенты; $a_1/a_2 \neq b_1/b_2 \neq c_1/c_2$.

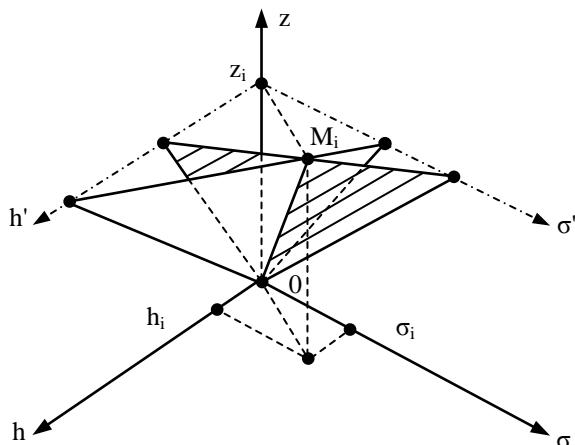


Рис. 8. Области значений физических параметров подповерхностного объекта

Fig. 8. Range of the physical parameters of subsurface objects

Разыскиваемое решение системы уравнений (20) представляет собой геометрическое место точек $M_i(\sigma_i; h_i; z_i)$, лежащих на одной пространственной прямой, проходящей через начало системы координат и являющейся линией пересечения двух плоскостей (21) и (22) (см. рис. 8).

Пространственная прямая ОМ фактически является общей осью целого набора пересекающихся в пространстве плоскостей, множество

которых образуется при различных значениях угловых коэффициентов линий пересечений соответствующих плоскостей (21) и (22) с координатными плоскостями σOz и $h Oz$. В рассматриваемом случае значения угловых коэффициентов линий пересечений будут определять конкретные физические свойства исследуемого ПО.

Наличие подобного набора плоскостей отражает реальное многообразие физических свойств ПО, которое требует выполнения обязательной процедуры калибровки ИУ в виде предварительного определения масштабных коэффициентов и коэффициентов статических функций преобразования ИК₁ и ИК₂ для предполагаемого ПО с конкретными физическими свойствами.

С учетом сделанных замечаний решение системы алгебраических уравнений (20) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{b_1 \cdot U_{\text{ИК}_2} - b_2 \cdot U_{\text{ИК}_1}}{a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2}; \\ h = \frac{a_2 \cdot U_{\text{ИК}_1} - a_1 \cdot U_{\text{ИК}_2}}{a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2}. \end{cases} \quad (23)$$

В соответствии с полученными алгоритмами (18) ВБ 17 осуществляет процесс окончательной идентификации ПО, то есть определяет глубину h залегания ПО и его идентификацию по величине σ .

Проведенные экспериментальные исследования макетного образца индукционной установки, имеющей описанный вариант структурной блок-схемы, показали высокую чувствительность, точность и достоверность поиска и идентификации ПО.

Заключение

Разработанный новый мультилинированный способ индукционного зондирования обеспечивает высокую эффективность поиска и идентификации различных подповерхностных объектов. Создание в контуре излучающей рамочной антенны РА резонансного режима возбуждения, а также использование двух независимых измерительных каналов и перевод приемной ферритовой магнитной антенны МА в режим магнитного усилителя, сигнал управления для которого получают посредством РА, обеспечивает повышенную чувствительность и точность зондирования, а также снижение в несколько раз порога чувствительности МА, выполняющей функции измерительного преобразователя.

Предложенный вариант ИУ, реализующий данный способ, обеспечивает высокую эффективность и простоту компенсации первичного поля, существенное снижение межвитковых утечек в катушках МА, уменьшение воздействия внешних электромагнитных помех, а также минимизацию влияния на выходные характеристики ИУ изменения параметров приемных катушек и ферромагнитного сердечника. Таким образом, разработанная ИУ обладает целым рядом преимуществ по сравнению с аналогами, что позволяет рекомендовать ее к использованию для оперативного обнаружения и точного определения месторасположения различного рода ПО при строительстве и земляных работах, при проведении аварийно-спасательных и ремонтных работ и т.п.

Предложенный вариант ИУ, наряду с поиском протяженных подземных инженерных сооружений (кабельных линий, трубопроводов и т.п.), отдельных подземных металлических объектов и геоэлектрических неоднородностей, легко адаптируется к следующим условиям работы:

- в качестве металлодетектора в службах охраны, безопасности, на предприятиях пищевой промышленности и т.д. для поиска нежелательных металлических предметов;
- в военном деле для поиска мин, снарядов;
- в качестве средства диагностики для мониторинга состояния железнодорожных путей, ответственных узлов грузоподъемных машин и механизмов, объектов котлонадзора;
- в качестве поискового средства при проведении работ строительными, техническими и аварийно-спасательными службами;
- при сортировке мусора на мусороперерабатывающих предприятиях;
- в археологии и кладоискательстве.

Список литературы

1. Charles Garrett. Modern Metal Detectors. New-York, 1998, 432 p.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. М.: Арабат-Информ, 2004. 138 с.
3. Адаменко М.В. Металлоискатели. М.: ДМК-пресс, 2006. 97 с.
4. Tang Z., Carter L.J. Metal detector head analysis. Fifth International Conference on Sensing Technology. 2011. Pp. 93–96. DOI: 10.1109/ICsensT.2011.6137076
5. Yamazaki S., Nakane H., Tanaka A. Basic analysis of a metal detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2002. Vol. 51. Iss. 4. Pp. 810–814. DOI: 10.1109/TIM.2002.803397
6. Cheng Y., Wang S., Zhang M. Research of miniature magnetic coil sensor used for detecting power cables underground. International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. Pp. 6065–6068. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057847
7. Куликов А.Л. Имитационное моделирование зондирования линий электропередач линейно-частотно-модулированными сигналами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 5–6. С. 52–62.
8. Олейникова Л.А. Совершенствование технологии поиска подземных коммуникаций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 4. С. 105–107.
9. Blay K.R., Weiss F., Clark D.A., de Groot G.J.J.B., Bick M., Sen D. Signal processing techniques for improved performance of a SQUID-based metal-detector. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009. Vol. 19. No. 3. Part 1. Pp. 812–815. DOI: 0.1109/TASC.2009.2017857
10. Lai W. Underground Utilities Imaging and Diagnosis. In book: Urban Informatics. 2021. Pp. 415–438. DOI: 10.1007/978-981-15-8983-6_24
11. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Методы подповерхностного зондирования и разработка устройства для локализации скрытых объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. №5. С. 33–46.
12. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Индукционная установка для дистанционного обнаружения подземных кабельных линий // Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: материалы IX Международной научно-технической конференции. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 310–315.
13. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №2(43). С. 70–78. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Khramshina E.A. Developing a combined method for detection of buried metal objects // Machines. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 92. DOI: 10.3390/machines9050092
15. Чернецов М.В. Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1 (23). С. 11–17.
16. Свистунов Б.Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2 (20). С. 94–100.
17. Нестеров В.Н., Ли А.Р. Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(7). С. 1414–1422.
18. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. М.: Форум-Инфра-М, 2002. 384 с.

References

1. Charles Garrett. Modern metal detectors. New York, 1998, 432 p.
2. Shcherbakov G.N. *Obnaruzhenie skrytykh obektov* [Detection of hidden objects]. Moscow: Arbat-Inform, 2004, 138 p. (In Russ.)
3. Adamenko M.V. *Metalloiskateli* [Metal detectors]. Moscow: DMK-press, 2006, 97 p. (In Russ.)
4. Tang Z., Carter L.J. Metal detector head analysis. Fifth International Conference on Sensing Technology. 2011, pp. 93–96. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076
5. Yamazaki S., Nakane H., Tanaka A. Basic analysis of a metal detector. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2002, vol. 51, iss. 4, pp. 810–814. DOI: 10.1109/TIM.2002.803397
6. Cheng Y., Wang S., Zhang M. Research of miniature magnetic coil sensor used for detecting power cables underground. International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011, pp. 6065–6068. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057847
7. Kulikov A.L. Simulation modeling of sounding of power lines with linear frequency-modulated signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems], 2007, no. 5–6, pp. 52–62. (In Russ.)
8. Oleinikova L.A. Improving the technology of searching for underground communications. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki* [News of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Natural Sciences], 2008, no. 4, pp. 105–107. (In Russ.)
9. Blay K.R., Weiss F., Clark D.A., de Groot G.J.J.B., Bick M., Sen D. Signal processing techniques for improved performance of a SQUID-based metal-detector. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2009, vol. 19, no. 3, Part 1, pp. 812–815. DOI: 0.1109/TASC.2009.2017857
10. Lai W. Underground utilities imaging and diagnosis. In book: Urban Informatics. 2021, pp. 415–438. DOI: 10.1007/978-981-15-8983-6_24
11. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Methods of subsurface sounding and development of a device for localizing hidden objects. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2020, no. 5, pp. 33–46. (In Russ.)
12. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Induction installation for a remote detection of underground cable lines. *Energetika: Upravlenie, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov: Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Power Industry: Management, Quality and Utilization Efficiency of Power Resources"]. Blagoveshchensk: Amur State University, 2019, pp. 310–315. (In Russ.)
13. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Hybrid induction sensing method for detection of underground cable lines and pipelines. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2019, no. 2(43), pp. 70–78. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Khramshina E.A. Developing a combined method for detection of buried metal objects. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 5. 92. DOI: 10.3390/machines9050092.
15. Chernetsov M.V. Invariant transformation in measuring systems with parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2018, no. 1 (23), pp. 11–17. (In Russ.)
16. Svistunov B.L. Measuring transducers for parametric sensors using analytical redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2017, no. 2 (20), pp. 94–100. (In Russ.)
17. Nesterov V.N., Li A.R. Theory and practice of constructing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 4 (7), pp. 1414–1422. (In Russ.)
18. Kelim Yu.M. *Tipovye elementy sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Typical elements of automatic control systems]. Moscow: Forum-Infra-M, 2002, 384 p. (In Russ.)

Поступила 05.10.2021; принята к публикации 28.11.2021; опубликована 24.12.2021

Submitted 05/10/2021; revised 28/11/2021; published 24/12/2021

Брякин Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор,

Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика.

Email: bivas2006@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7463-8072

Бочкарев Игорь Викторович – доктор технических наук, профессор,

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика.

Email: elmech@mail.ru. ORCID 0000-0002-9873-9203

Храмшин Вадим Рифхатович – доктор технических наук, профессор,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия,

Email: hvrmgm@gmail.com. ORCID 0000-0003-0972-2803

Ivan V. Bryakin – DrSc (Eng.), Professor,

Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, Kyrgyz Republic.

Email: bivas2006@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7463-8072

Igor V. Bochkarev – DrSc (Eng.), Professor,

Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic.
Email: elmech@mail.ru. ORCID 0000-0002-9873-9203

Vadim R. Khramshin – DrSc (Eng.), Professor,

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hvrmgm@gmail.com. ORCID 0000-0003-0972-2803