

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

<sup>1</sup> Институт автоматизации и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Разакова

## ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ТРУБОПРОВОДОВ

Проведен анализ принципов построения трассоискателей. Получено, что наибольшее применение получили индукционные трассовые методы, основанные на измерениях вторичных электромагнитных полей, которые создаются токами, наведенными в кабеле независимыми излучающими системами с помощью сторонних источников питания. Для реализации этих методов используются излучающие системы различных типов – рамочные или вибраторные антенны. При построении трассоискателей особое значение имеет взаимное расположение приемной и передающей катушек. Рассмотрены варианты взаимного расположения катушек. Получено, что при построении трассопоискового оборудования широкое применение имеют два базовых метода контроля: метод реакции параметров электромагнитного поля на внутренний или поверхностный импеданс среды при распространении электромагнитного поля соответственно в земле или над ее поверхностью, а также метод реакции входного импеданса приемной рамки на электромагнитные свойства зондируемой среды. Исходя из особенностей этих двух методов, предложен новый гибридный метод индукционного зондирования, который фактически объединяет эти два метода. При реализации этого гибридного метода индукционный зонд (ИЗ), который является индукционным преобразователем магнитного поля в электрический сигнал, содержит приемную ферритовую антенну (ФА) и рамочную антенну (РА), причем РА совмещает функции передающей и приемной антенн. Предложен вариант конструктивного исполнения ИЗ с компланарным размещением ФА относительно РА, который обеспечивает полную геометрическую компенсацию первичного поля.

При работе ИЗ информация регистрируется по одному информационному каналу от РА (текущее значение амплитуды возбуждающего тока) и по двум информационным каналам от ФА (текущие значения амплитуд напряжений соответственно активной и реактивной составляющих выходного сигнала ФА). Реализация такой информационной избыточности существенно повышает информативность, эффективность и достоверность предложенного гибридного метода

**Ключевые слова:** трассоискатель, индукционные трассовые методы зондирования, индукционный зонд, рамочные и ферромагнитные антенны, ферромагнитный сердечник, переизлученное поле, удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость объекта поиска, глубина залегания.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для поиска и определения местоположения и глубины залегания подземных кабельных линий, трубопроводов и других скрытых коммуникаций и металлосодержащих объектов, а также для обработки полученной измерительной информации широко применяются различные методы и устройства [1-6]. Их использование помогает избежать повреждений коммуникаций, повышает эффективность и безопасность работы на объектах, позволяет оценить их состояние, составить схему расположения и т.п. Поэтому работы, направленные на улучшение качества трассоискателей, являются весьма актуальными и имеют высокую практическую значимость.

#### АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРАССОИСКАТЕЛЕЙ

Работа трассоискателя основана на явлении электромагнитной индукции. Электрический сигнал, проходящий по металлическому объекту (кабелю или трубопроводу), создает электромагнитное поле, которое регистрирует трассоискатель. При этом посредством обнаружения магнитного поля констатируют наличие кабельной линии, а посредством измерения параметров этого поля определяют местоположение кабельной линии, глубину ее залегания и место повреждения.

Трассопоисковый комплект в общем случае состо-

ит из двух блоков – передающего и приемного. Передающий блок содержит генератор, являющийся передатчиком сигналов, а приемный блок содержит индукционный приемник в виде специальной катушки (гермагнитного локатора-приемника) и блока обработки сигнала приемника. Катушка улавливает электромагнитные волны в заданных диапазонах частот, а полученные сигналы обрабатываются микропроцессором. Для приема сигналов служат антенны, одна или несколько, различной конструкции и пространственной ориентации, которые могут иметь возможность поворачиваться.

Все искомые подземные коммуникации перед началом работ можно разделить на два вида – обесточенные и находящиеся под напряжением. В зависимости от этого различают два способа поиска кабеля – пассивный и активный (рис. 1).

Если кабель находится под напряжением, то можно контролировать электромагнитное поле, создаваемое током, проходящим через кабель. Такой поиск называется **пассивным**. Основным недостатком пассивного метода поиска является его невысокая точность, поскольку при высокой плотности кабельных коммуникаций посторонние магнитные поля создадут помехи и сделают поиск нужной кабельной трассы невозможным.

Для поиска обесточенных коммуникаций в комплект входит специальный генератор, который подает на кабель переменный ток определенной частоты.

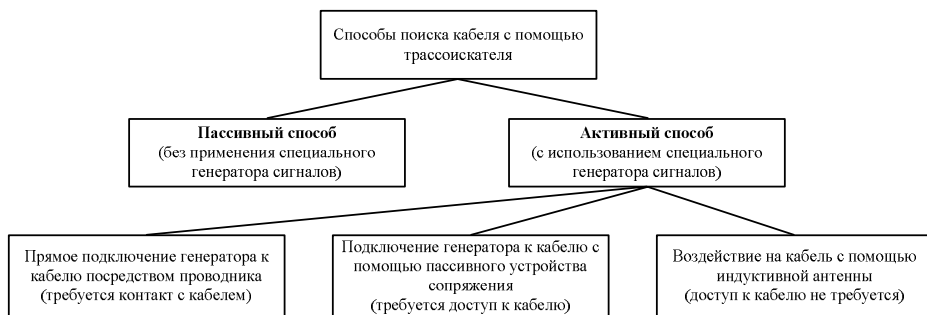


Рис. 1. Способы поиска кабеля с помощью трассоискателя

В этом случае целесообразно использовать более высокую частоту, не кратную 50 Гц, или изменять ее с заданной периодичностью для облегчения идентификации сигналов. Это упрощает и повышает достоверность поиска нужного кабеля. Поиск с использованием генератора называется **активным**. При таком поиске генератор или подключается напрямую к кабелю через проводник, или используют беспроводные методы создания наводки в кабеле с помощью индуктивной антенны, представляющей собой катушку, к которой непосредственно подключен генератор. В этом случае антенна располагается на поверхности непосредственно над кабелем и прямой электрический контакт кабеля и антенны не требуется.

Проведенный анализ показал, что среди всех известных трассовых методов поиска наибольшее применение получили индукционные методы, основанные на измерениях вторичных электромагнитных полей, которые создаются токами, наведенными в кабеле независимыми излучающими системами с помощью сторонних источников питания. Для реализации этих методов используются излучающие системы или магнитного типа (рамочные антенны), или электрического типа (вибраторные антенны). Излучающая система магнитного типа представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником или без него, а излучающая система электрического типа выполняется в виде электрического диполя и конструктивно состоит из двух разнесенных электродов и соединительного кабеля. Обе эти излучающие системы создают в окружающей среде первичное переменное электромагнитное поле, которое наводит в электропроводящих элементах кабеля ЭДС, которая, в свою очередь, является источником тока в этих элементах. Приемная система может содержать измерительные преобразователи для регистрации параметров индукции магнитного поля или параметров напряженности электрического поля.

Выбор того или иного вида излучающей системы, а также типа и ориентации измерительных осей преобразователей обуславливается той задачей, которая ставится при обнаружении и обследовании кабеля.

Эффективность применения аппаратуры для обнаружения и регистрации подземных кабельных линий в значительной мере зависит от конструкции и параметров используемого зонда, который является индукционным преобразователем магнитного поля в элек-

трический сигнал. Общие требования к индукционным зондам (ИЗ) установлены в [7]. Основными из них являются: селективность, т.е. избирательность обнаружения подповерхностных объектов поиска на фоне посторонних металлических предметов; помехоустойчивость, т.е. способность сохранять свои характеристики в условиях воздействия различных внешних факторов; высокие чувствительность, разрешающая способность и надежность работы; безопасность эксплуатации по отношению к человеку; технологичность изготовления и невысокая потребляемая мощность.

При построении трассоискателей особое внимание уделяется взаимному расположению приемной и передающей рамок ИЗ. В зависимости от разнота и взаимного расположения этих рамок различают совмещенные и разделенные системы. Совмещенные системы отличаются малым разнесом ( $L \approx a$ ) и фиксированным расположением рамок при их ориентации по минимуму первичного поля (рис. 2). Для разделенных систем ( $L \gg a$ ) характерен большой разнос и переменное расположение возбуждающей и приемной рамок. В этом случае приемная рамка ориентируется в различных направлениях.

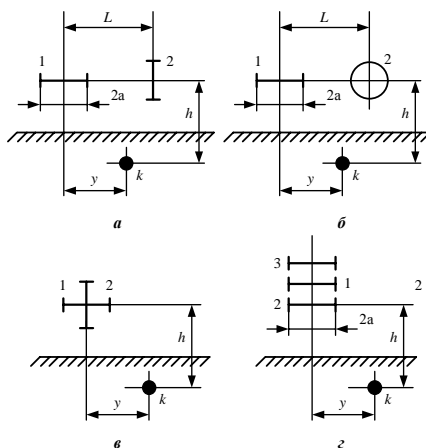


Рис. 2. Варианты взаимного расположения рамок ИЗ

Следует отметить, что к совмещенным системам предъявляются особо жесткие требования по компенсации первичного поля. Поэтому приемная и передающая рамки должны быть расположены так, чтобы при отсутствии электропроводящих предметов поле излучающей (генераторной) рамки не наводило сигнал в приемной рамке. Данному условию наилучшим образом соответствуют три основных варианта взаимного расположения рамок ИЗ [8] с непрерывным излучением гармонического сигнала зондирования, при которых не происходит наведение тока в приемной рамке: 1 – рамки с перпендикулярными осями (рис. 2, а и в); 2 – рамки со скрещивающимися осями (рис. 2, б); 3 – системы из нескольких рамок (количеством больше двух), расположенных компланарно и соответствующим образом включенных электрически (рис. 2, г). Например, на рис. 2, г изображена дифференциальная трехрамочная система, состоящая из компланарно расположенных одной излучающей 1 и двух идентичных приемных рамок 2 и 3. В этом случае приемные рамки 2 и 3 предполагают встречное включение. Поэтому в отсутствии электропроводящих предметов их суммарная ЭДС равна нулю.

Возможны также дифференциальные трехрамочные варианты, состоящие из ортогонально расположенных излучающей рамки 1 и системы из двух взаимно компланарно ориентированных идентичных приемных рамок 2 и 3 (рис. 3, а и б), имеющих встречное включение.

Кроме того, известно, что применение компланарно совмещенных рамок (приемный модуль) позволяет уменьшить габариты поисковой системы в целом. В этом случае приемный модуль можно выполнить в плоском корпусе с малой толщиной, который позволяет приблизить его на минимальное расстояние к поверхности земли. Рамки можно наложить друг на друга, чтобы суммарное электромагнитное поле через плоскость приемной рамки равнялось нулю. Основные варианты взаимного расположения компланарно совмещенных рамок приведены на рис. 4.

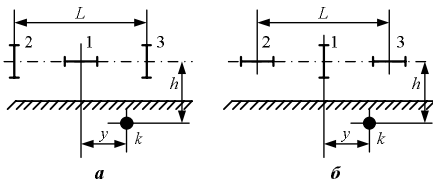


Рис. 3. Варианты дифференциальных трехрамочных систем

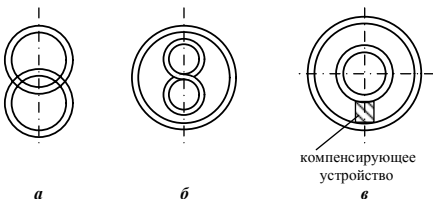


Рис. 4. Варианты компланарно совмещенных рамок ИЗ

В схеме на рис. 4, а взаимное расположение рамок выбрано таким, чтобы суммарный поток вектора магнитной индукции через поверхность, ограниченную приемной рамкой, равнялся нулю. В схеме на рис. 4, б приемная рамка сформирована в виде «восьмерки», так что суммарная ЭДС, наводимая на половине ее витков, расположенных в одном секторе «восьмерки», компенсирует аналогичную суммарную ЭДС, наводимую в другом секторе «восьмерки». Известны также разнообразные конструкции датчиков с компланарно совмещенными и аксиально-симметричными рамками (рис. 4, в). В этом случае приемная рамка расположена внутри излучающей рамки. Наводимая в приемной рамке ЭДС компенсируется специальным трансформаторным устройством, отбирающим часть сигнала излучающей рамки.

Существующие ограничения, определяющие область рационального применения рассмотренных модификаций ИЗ, связаны со следующими факторами: 1 – особенностями самих ИЗ; 2 – особенностями решаемых поисковых задач (обнаружение, детальная локализация объектов в плане и по глубине); 3 – особенностями самих объектов поиска (городские подземные коммуникации, междугородные кабельные магистрали и трубопроводы).

Поэтому исследования, направленные на разработку зондирующих установок (ЗУ), функционирование которых основано на новых физических принципах и оригинальных схемотехнических решениях, обеспечивающих в своей совокупности повышение эффективности поиска и определения пространственного местоположения подземных кабельных линий, трубопроводов и других скрытых коммуникаций, несомненно, являются востребованными.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотренные типы ИЗ ориентированы на реализацию метода реакции параметров электромагнитного поля на внутренний или поверхностный импеданс среды при распространении электромагнитного поля соответственно в земле или над ее поверхностью. Известны также однорамочные ИЗ параметрического типа, посредством которых осуществляется метод реакции входного импеданса приемной рамки ИЗ на электромагнитные свойства зондируемой среды [9].

Исходя из особенностей этих двух методов, можно предложить вариант нового индукционного трассового метода поиска подземных кабельных линий, который фактически объединяет эти два метода и по своей сути является гибридным методом индукционного зондирования.

Традиционно используемые конструкции ИЗ в основном ориентированы на применение приемных рамочных антенн (РА), которые по ряду своих показателей существенно уступают ферромагнитным антеннам (ФА), являющимися фактически «усилителями» магнитного потока. Применение в приемной антенне ИЗ ферромагнитного сердечника позволит уменьшить в ней количество витков ее обмотки, обеспечит увеличение чувствительности измерений и улучшение отношения сигнал/шум. В связи с этим становится очевидным, что при разработке индукционных трассоискателей приемную антенну ИЗ целесообразно выполнять на базе ФА.

Таким образом, предлагаемый вариант ИЗ, реализующий гибридный метод индукционного зондирования, предполагает наличие как приемной ФА, так и РА, совмещающей функции передающей и приемной антенн. Посредством ФА реализуется метод реакции параметров электромагнитного поля на внутренней или поверхностный импеданс среды, а с помощью РА осуществляется метод реакции входного импеданса приемной рамки на электромагнитные свойства зондируемой среды, причем ФА конструктивно представляет собой односекционную магнитную антенну, расположенную компланарно внутри горизонтальной РА.

Вариант конструкции ИЗ на базе ФА и РА в общем виде представлен на **рис. 5**.

ИЗ состоит из плоской многovitковой РА 1, размещенной на кольцевом диэлектрическом каркасе 2, и ФА, образованной совокупностью трех элементов: электрической обмотки в виде многослойного соленоида 3 и диэлектрического каркаса 4, образующих приемную электрическую катушку; ферритового цилиндрического сердечника 5. ФА закреплена внутри каркаса 2 в его плоскости в специальных диэлектрических втулках на диэлектрическом кольцевом кардановом подвесе 6, который позволяет ориентировать ось чувствительности ФА в требуемой плоскости. В свою очередь, кардановый подвес 6 базируется на цилиндрических штифтах 7 и 8, симметрично расположенных на внутренней поверхности кольцевого диэлектрического каркаса 2. Такое конструктивное решение обеспечивает взаимное ортогональное расположение генераторной рамки 1 и приемной электрической катушки ФА. При такой пространственной ориентации генераторной рамки и приемной катушки ФА будет выполняться условие начального равенства нулю коэффициента их взаимной индукции.

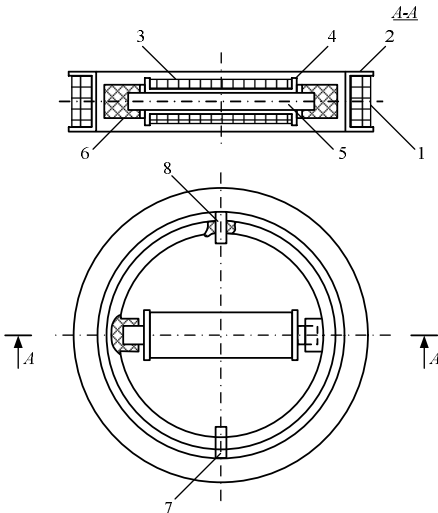


Рис. 5. Вариант конструкции индукционного зонда на базе ФА и РА

Высота карданового подвеса обеспечивается одного порядка с высотой кольцевого диэлектрического каркаса 2, что позволяет выставлять и фиксировать необходимый угол наклона чувствительной оси ФА по отношению к плоскости РА, обеспечивающий требуемый уровень геометрической компенсации первичного поля. Взаимное расположение приемной катушки ФА и РА в горизонтальной плоскости выставляется в два приема: сначала грубо, путем фиксации приемной катушки ФА в определенном месте сердечника 5, а затем плавно, посредством специального регулировочного микровинтового устройства (на **рис. 5** не показан).

Рассмотрим вариант схемотехнической реализации зондирующей установки (ЗУ) с ИЗ нового типа, структурная блок-схема которой представлена на **рис. 6**: 1 – ИЗ;  $R_{ИИЗ}$  – измерительный токовый шунт; 5 – измерительный усилитель; 6' и 6'' – буферные усилители; 7 – генератор синусоидального напряжения звуковых частот; 8 – формирователь квадратурных опорных напряжений; 9' и 9'' – синхронные детекторы (СД); 10' и 10'' – блоки АЦП; 11 – регистрирующее устройство; 12 – измеритель тока в РА; 13 – блок АЦП.

В состав ИЗ 1 входят РА 2, приемная катушка 3 и ферритовый сердечник 4. Элементы 3 и 4 ИЗ функционально образуют ФА. РА 2 по отношению к приемной катушке 3 ФА имеет ортогональное расположение, что обеспечивает необходимый уровень геометрической компенсации первичного поля для ФА.

**Особенности функционирования ЗУ.** От генератора синусоидального напряжения 7 сигнал рабочей частоты подается на РА 2. За счет этого в окружающем пространстве создается первичное переменное магнитное поле. Взаимное пространственное расположение приемной катушки ФА относительно генераторной рамки обеспечивает геометрическую компенсацию этого первичного поля. Следовательно, в отсутствие объекта поиска (ОП) во вмещающей среде, ЭДС на выходе измерительного усилителя 5 будет отсутствовать.

Первичное поле намагничивает ОП во вмещающей среде, за счет чего в ОП начинает протекать индуцированный ток, который создает вторичное (перезлученное) магнитное поле с измененной поляризацией. Вторичное поле воздействует на приемную катушку 3 ФА и наводит в ней ЭДС, в результате чего на выходе измерительного усилителя 5 появляется соответствующее напряжение.

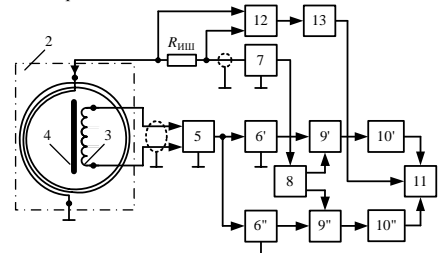


Рис. 6. Структурная блок-схема схемотехнической реализации зондирующей установки

Выходное напряжение имеет две составляющие: реактивную, которая в основном пропорциональна магнитной восприимчивости ОП, и активную, которая зависит от удельной электропроводности ОП. Это напряжение через буферные усилители  $6'$  и  $6''$  поступает на информационные входы соответствующих синхронных детекторов  $9'$  и  $9''$ . При этом опорные напряжения для этих синхронных детекторов формируют из рабочего синусоидального напряжения, которое с генератора 7 подается на вход формирователя 8 опорных напряжений (синфазного или квадратурного). Выходы формирователя 8 соединены с опорными входами синхронных детекторов  $9'$  и  $9''$ , выходы которых через соответствующие блоки АЦП  $10'$  и  $10''$  соединены с информационными входами регистрирующего устройства 11, которое фактически является информационно-вычислительным микропроцессорным модулем.

Отметим, что наведенные в ОП вихревые токи создают вторичное переменное электромагнитное поле, направление которого по закону Ленца противоположно возбуждающему полю. Напряженность результирующего магнитного поля будет равна разности напряженностей возбуждающего и вторичного магнитных полей.

Таким образом, электромагнитное поле вихревых токов, при неизменном напряжении питания РА, будет приводить к увеличению ее полного сопротивления и, как следствие, к уменьшению силы тока, протекающего в РА. Следовательно, полное сопротивление РА 2 будет зависеть от величины и характера распределения вихревых токов в ПО во вмещающей среде. В этом случае информативным параметром является амплитуда тока возбуждения РА.

С измерительного токового шунта  $R_{шн}$  снимается электрический сигнал, пропорциональный току возбуждения РА 2, и регистрируется измерителем тока 12, который осуществляет как селективную фильтрацию и усиления этого сигнала на частоте возбуждения РА, так и его амплитудное детектирование. С выхода измерителя тока 12 преобразованный сигнал через блок АЦП 13 поступает на соответствующий информационный вход регистрирующего устройства 11.

Вводимая в регистрирующее устройство 11 с информационных входов цифровая информация подвергается соответствующей алгоритмической обработке, по результатам которой и определяются требуемые параметры ОП во вмещающей среде.

Фактически при реализации гибридного метода индукционного зондирования информация регистрируется по одному информационному каналу от РА (текущее значение амплитуды возбуждающего тока) и по двум информационным каналам от ФА (текущие значения амплитуд напряжений соответственно активной и реактивной составляющих выходного сигнала ФА). Реализация такой информационной избыточности в гибридном методе индукционного зондирования существенно повышает его эффективность и достоверность.

Для более полного представления существа предлагаемого гибридного метода индукционного зондирования рассмотрим отдельные физические процессы, лежащие в его основе.

Рассмотрим особенности функционирования двух информационных каналов ФА.

Как указывалось ранее, конструктивно ФА представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала, подключенную к входному маломушумящему измерительному усилителю. Ферромагнитный сердечник, концентрируя в себе магнитные силовые линии, в итоге увеличивает магнитный поток, сцепленный с витками катушки индуктивности. По закону Фарадея напряжение  $U_{ФА}$  на выходе катушки индуктивности для внешнего переизлученного магнитного поля с амплитудой  $H_0$ , меняющейся по гармоническому закону с циклической частотой  $\omega$  и являющейся функцией физических параметров  $\sigma$  и  $\mu$ , определяется следующим соотношением [10]:

$$\dot{U}_{ФА} = i\omega\mu_{эфф}\mu_0NH_0(\sigma, \mu)S, \quad (1)$$

где  $i$  – мнимая единица;  $\mu_{эфф}$  – эффективная магнитная проницаемость сердечника;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;  $N$  – количество витков в катушке индуктивности;  $l$  – длина сердечника;  $S = \pi d^2/4$  – площадь сечения сердечника;  $d$  – диаметр сердечника;  $H_0 = F(\sigma, \mu)$  – амплитуда напряженности магнитного поля,  $\sigma$  и  $\mu$  – величины соответственно удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости ОП.

На рис. 7 представлена импедансная схема подключения ФА к входному измерительному усилителю. На рис. 7 обозначено:  $L$  и  $R$  – соответственно индуктивность и активное сопротивление приемной катушки индуктивности;  $C = C_{ФА} + C_{ВХ}$  – суммарная емкость цепей ФА и входа измерительного усилителя;  $C_{ФА}$  – распределенная межвитковая емкость приемной катушки индуктивности в сумме с другими паразитными емкостями датчика (емкость катушка–сердечник, катушка–экран и т.д.),  $C_{ВХ}$  и  $R_{ВХ}$  – входные емкость и сопротивление измерительного усилителя.

В соответствии с рис. 7 для сигнала непосредственно на входе усилителя можем записать следующее выражение:

$$\dot{U}_{ВХ} = \frac{\dot{Z}_{ВХ}}{(\dot{Z}_L + Z_R + \dot{Z}_{ВХ})} \dot{U}_{ФА} = \dot{P}(\omega) \dot{U}_{ФА}, \quad (2)$$

где  $\dot{P}(\omega)$  – комплексный частотно-зависимый коэффициент передачи;  $\dot{Z}_L = i\omega L$  и  $\dot{Z}_C = 1/i\omega C$  – соответственно индуктивное и емкостное сопротивления катушки индуктивности;  $Z_R = R$  – активное сопротивление катушки индуктивности;  $\dot{Z}_{ВХ} = \dot{Z}_C R_{ВХ} / (\dot{Z}_C + R_{ВХ})$  – входной импеданс измерительного усилителя.

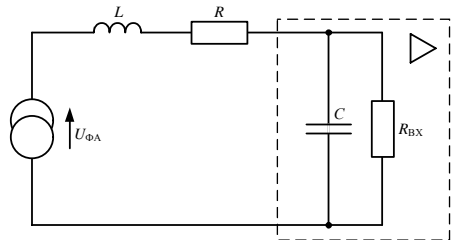


Рис. 7. Импедансная схема подключения ФА

Окончательное выражение с учетом (1) и (2) для амплитуды полезного сигнала ФА, приведенного ко входу усилителя, можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_{ВХ} = \dot{P}(\omega)j\omega\mu_{эфф}\mu_0NH_0(\sigma, \mu)S. \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) следует, что электрический сигнал с выхода измерительного усилителя имеет реактивную составляющую, пропорциональную в основном магнитной восприимчивости ОП, и активную составляющую, зависящую от его удельной электропроводности, соответственно,

$$U_{K_{ФА}} = k_{ИУ}k_K \left| \dot{U}_{ВХ} \right| \sin\varphi; \quad (4)$$

$$U_{C_{ФА}} = k_{ИУ}k_C \left| \dot{U}_{ВХ} \right| \cos\varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi$  и  $\omega$  – соответственно фаза и циклическая частота тока возбуждения РА;  $k_K$  и  $k_C$  – коэффициенты статических функций преобразования соответствующих СД.

На выходе измерительного усилителя 5 электрический сигнал будет представлять собой смесь информационного и шумового сигналов:

$$\dot{U}_{С_{ФА}} = \dot{U}_{ФА} + \dot{U}_{Ш}, \quad (6)$$

где  $\dot{U}_{Ш}$  – электрический сигнал, обусловленный наличием «белого шума» и случайных помех.

Статистическую функцию преобразования (СФП) практически любого измерительного преобразователя (ИП) можно представить в виде [11]:

$$y = a_1 + a_2x + \dots + a_n x^{n-1}, \quad (7)$$

где  $y$  – выходная величина;  $a_1, \dots, a_n$  – параметры ИП.

Сама процедура синхронного детектирования составляющих суммарного сигнала (6) позволяет значительно увеличить отношение сигнала-помеха (в десятки раз) и тем самым снизить влияние интенсивных шумов и случайных помех на результат измерения до минимума. Результаты преобразования блоками АЦП 10' и 10'' составляющих суммарного измерительного сигнала на выходах СД 9' и 9'' можно представить соответственно как

$$\begin{cases} U_{K_{ФА}} = a_1\sigma + b_1\mu; \\ U_{C_{ФА}} = a_2\sigma + b_2\mu, \end{cases} \quad (8)$$

где  $a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$  – коэффициенты СФП, соответственно квадратного и синфазного измерительных каналов ФА, определяемые на стадии начальной калибровки ЗУ путем воздействия на ФА определенного набора образцовых физических величин.

Значения вышеуказанных коэффициентов, полученных таким способом, заносятся в регистрирующее устройство И и используются им в дальнейшем для реализации необходимых вычислительных процедур.

В силу асимметричных свойств квадратных измерительных каналов ФА составленные уравнения измерений (8) являются линейно-независимыми алгебраическими уравнениями (принцип инвариантно-

сти) [12], что делает данную систему уравнений корректно составленной и разрешимой относительно искомым параметров  $\sigma$  и  $\mu$ .

Далее рассмотрим особенности работы информационного канала РА.

Известно, что поле в верхнем полупространстве будет представляться суммой первоначального поля РА и поля вихревых токов (переизлученное поле) вмещающей среды, определяемого в основном ОП. В связи с этим изменение конфигурации величины электромагнитного поля, связанного с ОП, влечет за собой изменение такого электрического параметра РА, как ее импеданс:

$$\dot{Z}_{\Sigma} = \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{ВН}, \quad (9)$$

где  $\dot{Z}_0$  – начальный импеданс РА;  $\dot{Z}_{ВН}$  – вносимый импеданс.

ЭДС, наводимая в РА электромагнитным полем вихревых токов проводящего полупространства, может быть представлена как ЭДС, наводимая РА, являющейся зеркальным изображением излучающей РА с комплексным током:

$$\dot{I}[F_1(\beta, \alpha) + iF_2(\beta, \alpha)], \quad (10)$$

где  $F_1(\beta, \alpha)$  и  $F_2(\beta, \alpha)$  – функции реакции, определяемые специальным табличным способом по обобщенным параметрам  $\beta$  и  $\alpha$ .

В соответствии с (10) полное выражение для расчета вносимого импеданса можно представить в виде [13]:

$$\dot{Z}_{ВН} = -\frac{6 \cdot 10^{-7} \omega w^2 R}{\beta^2} e^{-\frac{3}{2}\alpha} \left( 3 - \sqrt{9 + j4\beta^2} \right)^2, \quad (11)$$

где  $\alpha = 2h / R$  и  $\beta = R\sqrt{\sigma\mu_0}$  – обобщенные параметры для неферромагнитного ОП;  $R$  – радиус РА;  $w$  – число витков РА;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость ОП;  $\omega$  – циклическая частота тока возбуждения РА;  $h$  – глубина залегания ОП во вмещающей среде.

По закону Ома для комплексного значения тока возбуждения РА справедливо записать:

$$\dot{I}_{РА} = -\frac{\dot{U}_B}{Z_{\Sigma}}. \quad (12)$$

Тогда, согласно (12) сигнал с измерительного шунта можно представить в виде комплексной величины:

$$\dot{U}_{ИШ} = -\frac{\dot{U}_B}{Z_{\Sigma}} R_{ИШ}. \quad (13)$$

По аналогии с уравнениями измерения (8) для измерительного канала РА можем записать соответствующее уравнение вида

$$U_{ИШ} = a_3\sigma + b_3h, \quad (14)$$

где  $a_3, b_3$  – коэффициенты СФП измерительного канала РА.

Обобщая, составим систему уравнений измерительного процесса реализуемого ЗУ:

$$\begin{cases} U_{К_{ФА}} = a_1\sigma + b_1\mu; \\ U_{C_{ФА}} = a_2\sigma + b_2\mu; \\ U_{ИШ} = a_3\sigma + b_3h. \end{cases} \quad (15)$$

Уравнение (14), входящее в систему алгебраических уравнений (15), в силу своей физической сущности является линейно независимым по отношению к уравнениям (8). Поэтому система уравнений (15) в целом также является корректно составленной и разрешимой относительно искомым параметров ОП:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{b_1}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{C_{ФА}} - \frac{b_2}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{К_{ФА}}; \\ \mu &= \frac{a_2}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{К_{ФА}} - \frac{a_1}{a_2b_1 - a_1b_2} U_{C_{ФА}}; \\ h &= \frac{(a_2b_1 - a_1b_2)U_{ИШ} - a_3b_1U_{C_{ФА}} + a_3b_2U_{К_{ФА}}}{b_3(a_2b_1 - a_1b_2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Полученные выражения (16) фактически являются вычислительными алгоритмами для определения параметров ОП, которые непосредственно реализуются регистрирующим устройством 11 (см. рис. 6).

Таким образом, предложенный гибридный метод индукционного зондирования, реализующий принцип структурной избыточности, успешно решает задачу повышения эффективности процессов подповерхностного зондирования в целом. Он позволяет выполнить трассировку кабельной линии, определить место ее повреждения (по параметрам  $\sigma$  и  $\mu$ ), а также легко определить один из главных параметров подповерхностного зондирования – глубину залегания  $h$  ОП во вмещающей среде.

**Испытания макетного образца ЗУ.** В качестве ОП были выбраны четырехжильные силовые кабели АВВГ и ВВГ конечной длины (до 5 м), имеющие соответственно алюминиевые и медные жилы, изоляцию и внешнюю оболочку из ПВХ. ОП прокладывались в земле на глубинах от 0,5 до 2 м.

Каждый из указанных типов кабелей был представлен определенной конструкцией и соответствующими тремя вариантами сечений жил (основных и нулевых): 1) АВВГ/ВВГ – 3×95+1×50; 2) АВВГ/ВВГ – 3×70+1×35; 3) АВВГ/ВВГ – 3×50+1×25.

Первичная и вторичная обработка аналоговых сигналов осуществлялась посредством специального электронного модуля, функциональные узлы которого были выполнены на базе прецизионных операционных усилителей, а аналогово-цифровое преобразование сигналов и последующий ввод их численных значений (в цифровом виде) в регистрирующее устройство реализовывалось на базе стандартной системы сбора данных E502 производства «ЛКард» [6]. Данная система сбора данных фактически представляет собой универсальный 16-битный модуль ввода/вывода до 32-х аналоговых и 17-ти цифровых сигналов в персональный компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени.

В качестве переносного регистратора использовался ноутбук, программное обеспечение которого было ориентировано на реализацию измерительного алгоритма и соответствующую визуализацию результатов поисковой процедуры.

Экспериментальные исследования функциональных возможностей ЗУ, реализующей гибридный метод индукционного зондирования, проводился, как указывалось ранее на различных образцах ОП и на определенных глубинах их залегания во вмещающей среде, представляющей собой песчано-глинистую породу. Максимальная погрешность определения глубины залегания ОП в среднем составила 10÷15% на 2 м. При этом четко идентифицировался материал образца ОП и безошибочно определялась трасса его пролегания. На глубинах не более 0,5 м для третьего варианта сечений жил кабеля была выявлена возможность определения дефекта в виде обрыва одной из основных жил.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили в целом работоспособность варианта схемотехнической реализации ЗУ и эффективность самого гибридного метода индукционного зондирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Проведен анализ принципов построения трассоискателей.
2. Предложен вариант компоновки антенных модулей ЗУ, обеспечивающий повышение эффективности методов индукционного зондирования за счет реализации структурной избыточности.
3. Предложен новый гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения скрытых металлоемких объектов, например, подземных кабельных линий, трубопроводов и т.п.
4. Разработан вычислительный алгоритм, лежащий в основе предлагаемого гибридного метода индукционного зондирования.
5. Проведены испытания макетного образца ЗУ, которые подтвердили эффективность разработанного гибридного метода индукционного зондирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. М.: Арбат-Информ, 2004. 138 с.
2. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Индукционная установка для дистанционного обнаружения подземных кабельных линий // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 310–315.
3. Щербаков Г.Н. Параметрическая локация – новый метод обнаружения скрытых объектов // Специальная техника. 2000. №4. С. 52–58.
4. Никитин О.Р., Кучин С.И. Обнаружение скрытых объектов электромагнитно-акустическим методом // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвузовский сборник научных трудов. СПб: Гидрометеоздат, 2006. Вып. 7. С. 35–38.
5. Юров А.А. Технические средства диагностирования силовых кабельных линий 6–10 кВ с определением места повреждения методом колебательного разряда: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Новочеркасск, 2010. 179 с.
6. Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора

данных Л КАРД E502 // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 42–48.

7. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1975. 256 с.

8. Брякин И.В. Методы и средства подповерхностного зондирования // Проблемы автоматизации и управления. 2006. С. 116–126.

9. Брякин И.В. Индукционная установка для дистанционного зондирования // Проблемы автоматизации и управления. 2013. №1 (24). С. 93–103.

10. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 256 с.

11. Брякин И.В. Метод адаптивной редукции // Проблемы автоматизации и управления. 2014. №1 (26). С. 134–143.

12. Брюханов В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности. М.: Издательство стандартов, 1991. 345 с.

13. Захаров М.М. Датчики электропроводности. М.: Наука, 1979. 156 с.

Поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

HYBRID INDUCTION SENSING METHOD FOR DETECTION OF UNDERGROUND CABLE LINES AND PIPELINES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Head of the laboratory of information and measuring systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

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

The analysis of the principles of searchers construction was carried out. It was found that induction route methods based on measurements of secondary electromagnetic fields, which are created by currents induced in a cable by independent radiating systems using third-party power sources, have received the greatest use. For the implementation of these methods, radiating systems of various types are used, such as frame or vibrator antennas. When building locators, the mutual distribution of the receiving and transmitting coils is of particular importance. The research group considered options for the mutual arrangement of the coils. It was found that when building a track finding equipment, two basic methods of control are widely used: the response method of the electromagnetic field parameters to the internal or surface impedance of the medium when the electromagnetic field propagates in or above the ground, respectively, and the input impedance response method of the receiving frame on the electromagnetic properties of the medium being probed. Based on the features of these two methods, a new hybrid method of induction sounding was proposed, which actually combines these two methods. When implementing this hybrid method, an induction probe (IP), which is an induction transducer of a magnetic field into an electrical signal, contains a receiving ferrite antenna (FA) and a loop antenna (LA), and LA combines the functions of transmitting and receiving antennas. A design variant of an IP with coplanar placement of FA relative to LA, which provides full geometric compensation of the primary field, is proposed.

When IP operates, information is recorded on one information channel from LA (the current value of the amplitude of the exciting current) and on two information channels from the FA (current values of the amplitudes of the voltages of the active and reactive components of the output signal of the FA, respectively). The implementation of such information redundancy significantly increases the information content, efficiency and reliability of the proposed hybrid method.

**Keywords:** locator, induction route sensing methods, induction probe, framework and ferromagnetic antennas, ferromagnetic core, reradiated field, specific electrical

conductivity and magnetic permeability of the object of search, depth.

REFERENCES

1. Shcherbakov G.N. *Obnaruzhenie skrytykh ob'ektov* [Detection of hidden objects]. М.: Arbat-Inform, 2004. 138 p. (In Russian)

2. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Induction installation for remote detection of underground cable lines // Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Energetika: Upravlenie, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov"* [Materials of the IX International Scientific-Technical Conference "Energy: Management, Quality and Energy Efficiency"]. Blagoveshchensk: Amur State University Press, 2019, pp. 310–315. (In Russian)

3. Shcherbakov G.N. Parametric location – a new method for detecting hidden objects. *Spetsialnaya tekhnika* [Special equipment], 2000, no. 4, pp. 52–58. (In Russian)

4. Nikitin O.R., Kuchin S.I. Detection of hidden objects by the electromagnetic-acoustic method // *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii: mezhdunarodskiy sbornik nauchnykh trudov* [Methods and devices for information transmission and processing: an inter-educational collection of scientific works]. S. Peterburg: Gidrometeoizdat, 2006, vol. 7, pp. 35–38. (In Russian)

5. Yurov A.A. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya silovykh kabelnykh liniy 6-10 kV s opredeleniem mesta povrezhdeniya metodom kolebatelnogo razryada*. Kand.Diss. [Technical means of diagnosing power cable lines 6-10 kV with determining the location of damage by the oscillatory discharge method: Ph.D. Diss.: 05.14.02]. Novocherkassk, 2010. 179 p.

6. Verzunov S.N., Bochkarev I.V. Development of a software component of the tracker based on the L CARD E502 data acquisition device. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 2(39), pp. 42–48.

7. Vanyan L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* [Fundamentals of electromagnetic soundings]. Moscow: Nedra, 1975. 256 p. (In Russian)

8. Bryakin I.V. Methods and tools for subsurface sensing.



- Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of automatics and control], 2006, pp. 116–126. (In Russian)
9. Bryakin I.V. Induction installation for remote sensing. *Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of automation and control], 2013, №1 (24). pp. 93–103. (In Russian)
  10. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya* [Electromagnetic control methods and devices]. Moscow: Spektr Publishing House, 2010. 256 p. (In Russian)
  11. Bryakin I.V. Adaptive Reduction Method. *Problemy avtomatiki i kontrolya* [Problems of Automation and Control], 2014, no. 1 (26), pp. 134–143. (In Russian)
  12. Bryukhanov V. A. *Metody povysheniya tochnosti izmereniy v promyshlennosti* [Methods of increasing the accuracy of measurements in industry]. Moscow: Publishing house of standards, 1991. 345 p. (In Russian)
  13. Zakharov M.M. *Datchiki elektroprovodnosti* [Conductivity sensors]. M.: Science. 1979, 156 p. (In Russian)
- 

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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Hybrid Induction Sensing Method for Detection of Underground Cable Lines and Pipelines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 70-78. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78)

---