

ЛАБОРАТОРНАЯ И ПОЛЕВАЯ КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Давыдов В.А. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Рассмотрены методические приемы калибровки магнитоиндукционных датчиков и электрических антенн в лабораторных и полевых условиях. Представлены функциональные схемы лабораторных калибровочных стендов и описание их работы. Показана возможность проведения полевых калибровок с помощью различных видов источников электромагнитных сигналов. Теоретические расчеты амплитудно-частотных характеристик датчиков хорошо согласуются с результатами экспериментальных работ. Среднеквадратическое отклонение лабораторных и полевых калибровок обоих типов датчиков не превышают допустимой погрешности полевых измерений. Выделены положительные моменты и недостатки различных способов тестирования датчиков, приведены примеры полученных амплитудно-частотных характеристик.

Магнитоиндукционные датчики, электрические антенны, амплитудно-частотная характеристика.

LABORATORY AND FIELD CALIBRATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSDUCERS FOR GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS

Davydov V.A. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Methodical ways of calibration magnetic transducers and electric aeriels in laboratory and field conditions are considered. Function charts laboratory test benches and the description of their operation are presented. Possibility of carrying out of field calibrations by means of various kinds of electromagnetic signal transmitters is shown. Theoretical calculations of gain-frequency characteristics of transducers are well concordanted with results of experimental works. Mean square deviation of laboratory and field calibrations of both transducers types do not exceed an admissible error of field measurements. Positive moments and deficiencies of various ways of transducers testing are noted, examples of the observed gain-frequency characteristics are resulted.

Magnetic transducers, electric aeriels, gain-frequency characteristic.

Введение

В практике геофизических исследований для измерения переменных электромагнитных (ЭМ) полей используют различные типы электрических и магнитных датчиков сигналов. К наиболее распространенным из них относятся электрические антенны (ЭА) и магнитоиндукционные датчики (МИД). В электроразведочных методах, основанных на изучении импеданса среды, необходимо проводить синхронные измерения различных составляющих электромагнитного поля. К таким методам относятся: радиоконпарация и пеленгация сверхдлинноволновых радиостанций (радикип СДВР), дистанционно-частотные измерения и все магнитотеллурические методы исследований, включая аудиомангнитотеллурические зондирования (АМТЗ). Импеданс, или волновое сопротивление среды, определяется отношением

взаимно перпендикулярных компонент напряженности электрического и магнитного полей (Хмелевской, 1984):

$$Z_{xy} = E_x/H_y; Z_{yx} = E_y/H_x,$$

где E_x , E_y – горизонтальные компоненты электрического поля, В/м; H_x , H_y – горизонтальные компоненты магнитного поля, А/м.

На фиксированной рабочей частоте f формулу для определения импеданса можно представить в общем виде (Электроразведка, 1989):

$$Z = (U_e / U_m) \cdot (g / h_a),$$

где U_e – напряжение на выходе электрической антенны, В; U_m – напряжение на выходе магнитного датчика, В; g – чувствительность магнитного датчика, В/(А/м); h_a – действующая длина электрической антенны, м.

Если измерения проводятся в широкой

полосе частот, необходимо учитывать частотную зависимость коэффициентов преобразования электрических и магнитных датчиков:

$$Z(f) = (U_e / U_m) \cdot (g(f) / h_a(f)),$$

где $g(f)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) МИД; $h_a(f)$ – АЧХ электрической антенны.

Так как разные типы ЭМ датчиков имеют различные АЧХ, то важнейшей задачей электрометрических исследований на переменном токе является определение характеристик $g(f)$ и $h_a(f)$ для корректных вычислений импеданса на различных частотах. Диапазон рабочих частот упомянутых методов электроразведки лежит от долей герц до десятков килогерц. Нами будет рассмотрена калибровка электрических и магнитных датчиков в расширенном диапазоне звуковых частот от 10 Гц до 40 кГц. Вопросы согласования измерительных каналов с датчиками сигналов затрагиваться не будут, т. к. были подробно рассмотрены ранее (Давыдов, 2017).

Требования к проведению геофизических работ регламентируют поверку электроразведочной аппаратуры (вместе с датчиками) не менее двух раз в год – перед проведением полевых работ и после их завершения. Такие периодические испытания обычно выполняются в лабораторных условиях. В процессе проведения полевых работ нередко приходится ремонтировать приборы или производить замену датчиков, после чего по правилам требуется по-

вторное тестирование. В этом случае необходимы методики полевых испытаний аппаратуры и датчиков сигналов.

Калибровка магнитных датчиков

Магнитоиндукционные датчики для измерения переменных магнитных полей представляют собой многовитковые катушки, часто с сердечником из ферромагнитного материала (феррит, пермаллой). В индукционных методах исследований обычно используются катушки, настроенные в резонанс на фиксированных рабочих частотах аппаратуры (Иголкин и др., 2013). При наблюдениях в широкой полосе частот применяются активные схемы включения МИД с усилением и обратной связью. Это позволяет повысить чувствительность датчиков и сделать линейным их АЧХ. Лабораторная калибровка датчиков магнитного поля со снятием амплитудно-частотной характеристики проводится на специальном стенде (рис. 1).

Схема функционирует следующим образом: задающий генератор (Г) вырабатывает синусоидальный сигнал, который усиливается по мощности усилителем тока (УТ) и подается на излучатель магнитного поля (ИМ), представляющего собой воздушный соленоид большого диаметра. В качестве задающего применяется лабораторный генератор сигналов, а схемотехника УТ ориентирована на работу с низкоомной индуктивной нагрузкой. Для непрерывного контроля за величиной тока в цепи соленоида устанавливается шунт $R_{ш}$.

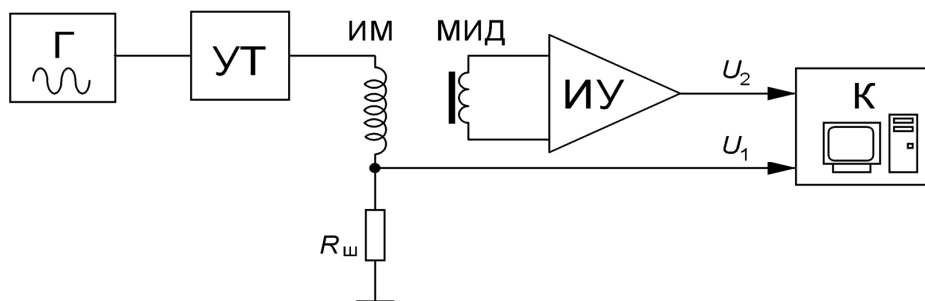


Рис. 1. Блок-схема стенда для калибровки датчиков переменного магнитного поля:

Г – генератор сигналов; УТ – усилитель тока; ИМ – излучатель магнитный (соленоид); МИД – магнитоиндукционный датчик; ИУ – измерительный усилитель; К – компьютер; U_1 – контроль за величиной магнитного поля; U_2 – выходной сигнал

Падение напряжения на шунте U_1 подается на один из линейных входов звуковой карты компьютера (К). Величина магнитного поля, создаваемого соленоидом, вычисляется по известным формулам из общего курса физики. Для более точного расчета используется программа ViziMag (Beeteson, 2001), позволяющая моделировать поведение магнитных полей от различных видов излучателей с заданными характеристиками. Тестируемый магнитоиндукционный датчик (МИД) располагается на одной оси с соленоидом, на некотором расстоянии от него, чтобы исключить взаимное влияние генерирующей и приемной катушек. Сигнал с датчика усиливается измерительным усилителем (ИУ) и в виде напряжения U_2 поступает на второй аудио вход компьютера. В составе современных звуковых карт имеется специальный аудио-процессор, содержащий двухканальный 16/24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с независимыми частотами дискретизации до 96 кГц, что позволяет в реальном масштабе времени оцифровывать сигналы частотой до 48 кГц. Дальнейшая регистрация и обработка сигналов в цифровом виде выполняются программой SpectraLAB (Sound Technology Inc.), главной задачей которой является спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье. С помощью этой же программы осуществляется калибровка АЦП звуковой карты опорным сигналом. Чувствительность МИД определяется по отношению напряжения отклика с датчика к величине магнитного поля в точке наблюдения. Измерения проводятся в заданном частотном диапазоне (10 Гц–40 кГц) с помощью свип-сигнала, а также на отдельных фиксированных частотах, для контроля точности. По результатам калибровки строится амплитудно-частотная зависимость чувствительности магнитного датчика $g(f)$. Активные датчики обычно получают питание от внешней аппаратуры и работают вместе с ней. Таким образом, тестированию подвергается сквозной тракт датчика с измерительным усилителем. В качестве ИУ используется универсальный

геофизический приемник ОМАР-2 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) (Давыдов, 2016), который применяется при проведении полевых работ различными электромагнитными методами исследований.

Полевая калибровка МИД осуществляется путем сравнения отклика установленных рядом эталонного и испытуемого датчиков на внешний сигнал переменного магнитного поля. Поблизости не должно находиться возмущающих магнитное поле металлических объектов (труб, столбов, железобетонных конструкций и т. п.). В качестве источника сигнала используются стандартные электроразведочные генераторы с излучателем типа вертикального магнитного диполя. Так как полевая аппаратура работает на фиксированных частотах, снимаются калибровочные данные в отдельных точках частотного диапазона. Например, генератор ФАГР-10 (НПО Сибцветметавтоматика, г. Красноярск) имеет всего три рабочих частоты: 500 Гц, 2 и 8 кГц. У индукционной аппаратуры МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) (Байдинов, Человечков, 2011) уже восемь частот, но часть из них выходит за пределы используемого диапазона, поэтому применяется только шесть рабочих частот. В зависимости от модификации прибора используются две частотные сетки:

- 1; 2; 4; 8; 16; 32 кГц;
- 1,25; 2,5; 5; 10; 20; 40 кГц.

Для эталонных измерений переменного магнитного поля в полевых условиях применяются аттестованные приборы зарубежных фирм Phoenix (Канада) и Metronix (Германия), либо магнитные датчики, прошедшие лабораторную поверку.

Калибровка электрических антенн

Снятие характеристик электрических антенн в лабораторных условиях несколько отличается от калибровки магнитных датчиков и имеет свою специфику. Однако функциональные схемы калибровочных стендов похожи и имеют много общих элементов (рис. 2).

Основное отличие заключается в использовании усилителя напряжения (УН) в

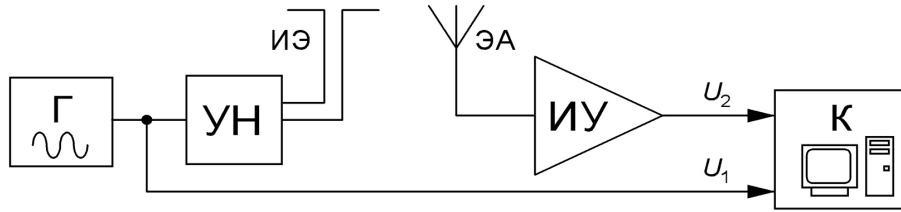


Рис. 2. Блок-схема стенда для калибровки электрических антенн:

Г – генератор сигналов; УН – усилитель напряжения; ИЭ – излучатель электрический; ЭА – электрическая антенна; ИУ – измерительный усилитель; К – компьютер; U_1 – контрольное напряжение с генератора; U_2 – выходной сигнал

качестве усилителя мощности. При этом выходной каскад УН ориентирован на работу с высокоомной емкостной нагрузкой для лучшего согласования с электрическим излучателем (ИЭ). Излучателем служит симметричная емкостная антенна, сделанная из двух отрезков коаксиального кабеля с подключением оплеток. Тестируемая электрическая антенна (ЭА) укладывается параллельно ИЭ, в непосредственной близости. При правильном согласовании с измерительным усилителем (ИУ) максимальная действующая длина приемной ЭА равна половине ее реальной длины (Вишняков, Вишнякова, 1974), поэтому не требуется вычислять коэффициент преобразования антенны, достаточно снять ее частотную характеристику. В качестве ИУ, как и в предыдущем случае, выступает полевой геофизический приемник ОМАР-2, имеющий высокое входное сопротивление и малую входную емкость. Напряжение U_1 , поступающее с задающего генератора, необходимо для нормирования выходного сигнала U_2 . Если результат калибровки в виде нормированных отношений U_2/U_1 приведем к уровню 0,5, то получим идеализированную АЧХ действующей длины приемной антенны $h_a(f)$. Следует отметить, что за счет высокого входного сопротивления ИУ может возрасти амплитуда сетевых наводок. Для улучшения соотношения сигнал/шум следует увеличить габариты ИЭ или повысить выходное напряжение усилителя мощности.

Полевая калибровка ЭА позволяет получить истинные значения действующей длины антенны h_a , но только на отдельных

частотах. Их значения определяются частотной сеткой используемых электроразведочных генераторов, например, для аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП ЭРА, г. Санкт-Петербург) рабочие частоты составляют 625 Гц, 1250 Гц, 2,5 кГц и 5 кГц. Полевые наблюдения проводятся на ровном участке земной поверхности с однородным геологическим строением. Подключенная к генератору и заземленная на концах питающая линия AB располагается в нескольких метрах от тестируемой ЭА. Рядом с электрической антенной, соединенной с геофизическим приемником ОМАР-2, растягивают заземленную приемную линию MN , подключаемую к электроразведочному приемнику ЭРА-МАКС. Все электрические линии располагаются параллельно, при этом длина линии MN должна равняться длине ЭА, для исключения влияния приповерхностных неоднородностей. Тогда действующая длина антенны соответствует отношению: $h_a = U_e / U_{MN}$, где U_{MN} – напряжение на выходе заземленной приемной линии. Для расширения полевой калибровки в диапазоне низких частот можно использовать «естественные» генераторы электрических полей – линии электропередачи (ЛЭП) (Титлинов, 1992). В этом случае к частотам калибровки можно добавить частоту электрической сети 50 Гц с рядом гармоник: 100, 150, 250 Гц и других.

На рис. 3 приведены примеры лабораторной и полевой калибровки активного магнитоиндукционного датчика АМД-6 и 10-метровой симметричной электрической антенны, изготовленной из каротажного кабеля КТШ-0,3 (КГЗ-3-70Ш).

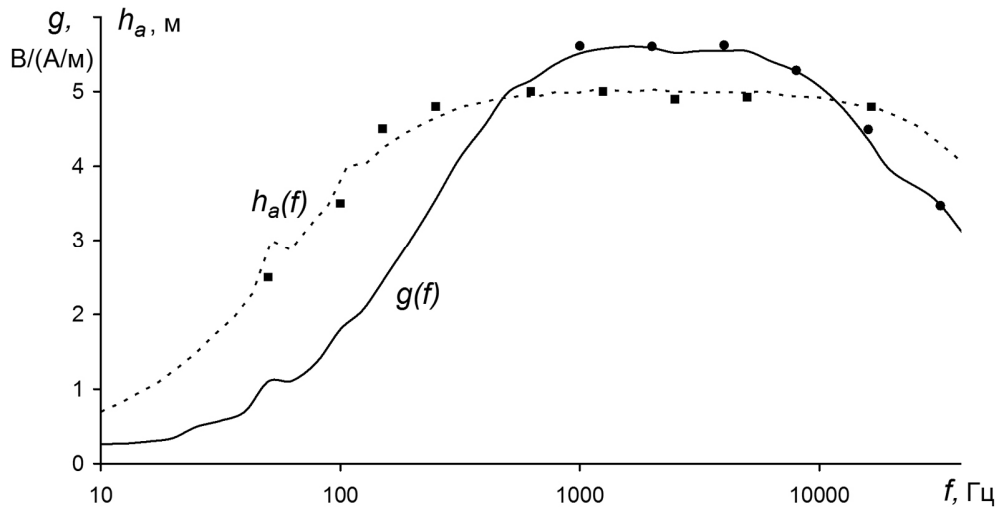


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики магнитоиндукционного датчика $g(f)$ и электрической антенны $h_a(f)$. Линиями показаны результаты лабораторной калибровки, кружочками и квадратами – полевой калибровки МИД и ЭА

Теоретические расчеты характеристик электромагнитных датчиков довольно хорошо согласуются с данными лабораторных калибровок. Отклонение нормированных теоретических и практических АЧХ не более 3%, за исключением сетевых помех 50 и 100 Гц. Полевое тестирование электрической антенны с помощью ЛЭП более точно соответствует теоретической кривой на промышленных гармониках 50, 100, 150 и 250 Гц, т. к. в данном случае они выступают в качестве калибровочного сигнала. Еще одна возможность использования при полевой калибровке незаземленных электрических линий с контролируемым источником сигнала (Kuras et al., 2006) подтверждается успешным применением бесконтактной аппаратуры Электротест ЕИС-3к (НТК Диоген, г. Москва) на частоте 16,5 кГц. Среднеквадратическое отклонение лабораторных и полевых калибровок обоих типов датчиков не превышают 5%, что меньше допустимой погрешности полевых наблюдений.

Заключение

С помощью описанных методических приемов проводилась калибровка и поверка разработанных в Институте геофизики УрО РАН различных датчиков электромагнитных сигналов. В их число входят резо-

нансные и широкополосные магнитные датчики индукционного типа (рамочные и ферритовые), стелющиеся электрические линии и портативные емкостные антенны. Протестированные датчики успешно используются в составе различных модификаций измерительной аппаратуры серии ОМАР-2 (Давыдов, 2015а) при проведении научно-исследовательских и производственных работ электромагнитными методами геофизической разведки (Давыдов, 2014; 2015б; Давыдов и др., 2017).

Литература

- Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.
- Вишняков А.Э., Вишнякова К.А. Возбуждение и измерение полей в электроразведке. Л.: Недра, 1974. 129 с.
- Давыдов В.А. Аудиомагнитотеллурическая съемка в движении // Геофизика. 2014. № 2. С. 47–53.
- Давыдов В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // Уральский геофизический вестник. 2015а. № 1 (25). С. 37–41.
- Давыдов В.А. Электроразведочные технологии при поисках подземных вод в скальных массивах // Инженерные изыскания.

2015б. № 2. С. 58–64.

Давыдов В.А. Универсальный полевой геофизический приемник ОМАР-2 // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 127–128.

Давыдов В.А. Новые электромагнитные датчики для среднечастотной электроразведки // Датчики и системы. 2017. № 11. С. 58–62.

Давыдов В.А., Байдииков С.В., Астафьев П.Ф. Изучение поляризационных эффектов индукционными методами электроразведки на примере Чусовского месторождения // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 39–44.

Иголкин В.И., Хохлов М.Ф., Тронин О.А., Алешечкин А.М. Аппаратура электромагнитных (индуктивных) методов переменного гармонического тока и эффективность её применения в рудной и инженерной геологии. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 138 с.

Титлинов В.С. О возможности использования полей-гармоник 50-периодного тока промышленных ЛЭП в многочастотной электроразведке // Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: Наука. Урал. отделение, 1992. С. 64–77.

Хмелевской В.К. Электроразведка. М.: Изд-во МГУ, 1984. 422 с.

Электроразведка. Справочник геофизика. В 2-х кн. 2-е изд. перераб. и доп. / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. Кн. 1. 438 с.

Beeteson J.S. Visualising magnetic fields: numerical equation solvers in action. London: Academic Press, 2001. Vol. 1. 159 p.

Kuras O., Beamish D., Meldrum Ph.I., Ogilvy R.D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // Geophysics. 2006. 71(3). G135–G152.