

© И. Р. АСМАНДИЯРОВ, В. А. МИХЕЕВ

Тюменский государственный университет
asmild@mail.ru, vmikheev@utmn.ru

УДК 537.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ
EXPERIMENTAL UNIT FOR PHYSICAL MODELING
OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN CONDUCTING MEDIA**

Разработана и сконструирована экспериментальная установка для физического моделирования электромагнитных полей в проводящих средах, в которой автономный источник сигнала в герметичном экранированном корпусе погружается в проводящую среду вместе с излучающим диполем, что позволяет минимизировать влияние соединительных линий. Индуцированное излучателем распределение потенциалов на поверхности проводящей среды измеряется при непрерывном изменении расстояния между зондирующими электродами.

Конструкцией стенда предусмотрена возможность измерения величины силы тока, стекающего в среду, и напряжения на плечах диполя, по которым рассчитывается кажущееся сопротивление среды.

С помощью разработанной установки проведено экспериментальное исследование электромагнитного поля в однородной проводящей среде, которое показало качественное согласие математической и физической модели.

Экспериментальная установка может найти применение в решении задач по разработке устройств, предназначенных для создания электромагнитных полей в реальных проводящих средах, при разработке беспроводных каналов связи, а также для решения геофизических задач.

Experimental installation for physical modeling of electromagnetic fields in conducting media has been designed and constructed. In this installation an autonomous source in a sealed and shielded enclosure is immersed in a conductive medium, together with the radiating dipole, that allows to minimize the influence of the connection lines. Potential distribution on the surface of a conductive medium induced by radiator is measured with continuous change of the distance between the sensor electrodes.

The design of the stand provides the ability to measure the magnitude of the current flowing in the medium and the voltage on the shoulders of the dipole, which calculated the apparent resistance of the medium.

The constructed installation has been used to carry-out experimental studies of the electromagnetic field in a homogeneous conducting medium, which showed qualitative agreement between mathematical and physical model.

Experimental setup can be used in solving problems of development of devices designed to generate electromagnetic fields in real conducting media, the development of wireless communication channels, and solutions for geophysical problems.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Электромагнитное поле, разность потенциалов, диполь, моделирование, проводящее полупространство.

KEY WORDS. Electromagnetic field, difference of potentials, dipole, simulation, conductive half-space.

Введение

При решении ряда практических задач необходимо иметь представление о распределении электромагнитного поля на границе «воздух — проводящая среда». В последние годы задачи такого типа решаются вычислительными методами [1-4]. Экспериментальная проверка полученных расчетов представляется полезной. В настоящей работе была поставлена задача разработки экспериментальной установки (стенда) для исследования распределения электромагнитного поля на границе «проводящая среда — воздух» и измерения тока, стекающего в проводящую среду, и отработки методики измерений. Стенд может применяться при разработке беспроводных устройств получения и передачи информации в проводящих средах, например, для управления роботизированными подводными аппаратами, обнаружения крупных объектов, погруженных в морскую воду, или решения геофизических задач [5; 6].

Описание экспериментальной установки

Стенд представляет собой прямоугольный бассейн размерами 3,5×3,5×1 м. Стенки бассейна изготовлены из листовой стали толщиной 3 мм. С внутренней стороны стенки имеют электрическую изоляцию листовым пористым пластиком толщиной 4,5 мм. Схема установки изображена на рис. 1.

Проводящая среда наиболее удобным образом моделируется 20% водным раствором хлорида натрия [7], поскольку хорошо известна зависимость удельного сопротивления от температуры и концентрации, заполняющим бассейн до высоты 0,45 м. Электромагнитное поле создается излучателем — линейным несимметричным диполем, представляющим собой проволоку сечением 1 мм², разрезанную на две части разной длины, отделенные друг от друга зазором (разделителем). В месте расположения зазора к диполю подключен автономный генератор синусоидальной электродвижущей силы (ЭДС), реализованный на базе микросхемы AD9833. Изменение глубины погружения диполя реализовано винтовым приводом и шаговым управляемым компьютером электромотором. При этом верхняя часть диполя находится в воздухе и в токораспределении не участвует.

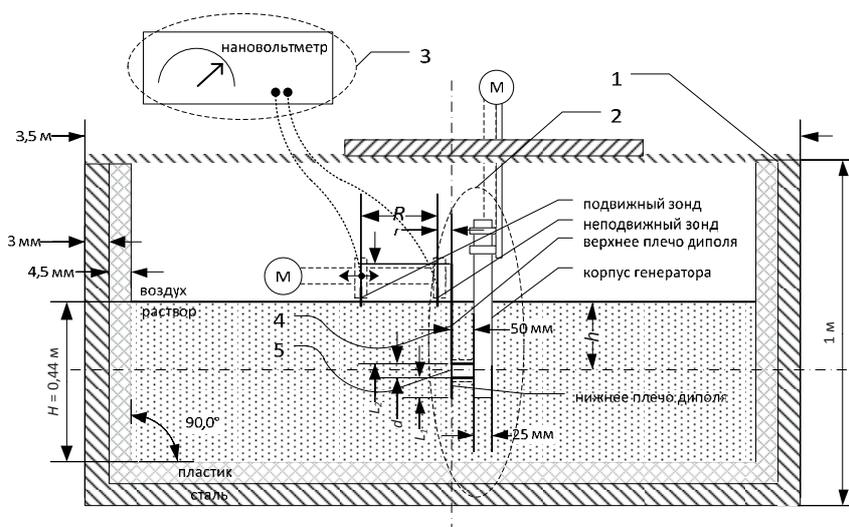


Рис 1. Схема экспериментальной установки.

1 — электролитический бассейн, 2 — излучающий диполь,
3 — регистрирующая аппаратура

Потенциал на поверхности проводящей среды измеряется посредством двух зондов, подвижного и неподвижного (рис. 1), представляющих собой стальные позолоченные контакты штырькового типа. Неподвижный зонд фиксируется на определенном расстоянии от места погружения диполя, положение подвижного зонда в процессе эксперимента изменяется также с помощью электропривода прямолинейно с постоянной скоростью. Зонды подключаются к селективному нановольтметру Unipantype 233 (рабочий диапазон частот 1,5-150 000 Гц), или цифровому осциллографу, с помощью которых регистрируется разность потенциалов между зондами.

Исследование характеристик генератора

Структурно генератор состоит из двух взаимосвязанных частей — аналоговой и цифровой. Энергообеспечение генератора осуществляется двумя источниками постоянной ЭДС величиной — 5 В для цифровой части, и 5-12 В — аналоговой. Стабильность напряжений питания обеспечивается в первом случае стандартным напряжением питания на шине USB, во втором случае — с помощью DC-DC конвертера на уровне 5 В. Ток холостого хода составил 20÷30 мА. Пределы изменения амплитуды выходного синусоидального сигнала от 0 до 5 В. Максимальная частота генератора ограничена техническими характеристиками операционных усилителей [8] и составляет 2 МГц. Дальнейшее увеличение частоты приводит к быстрому снижению ЭДС генератора. Как показывают эксперименты, генерируемая частота не зависит от напряжения питания, однако при понижении напряжения питания цифровой части генератора до 3÷3,3 В, или аналоговой части ниже 4,2÷4,5 В, происходит срыв генерации.

Для выбора рабочего диапазона частот необходимо, чтобы выходное сопротивление генератора было незначительным и не изменялось при изменении частоты. Для этого была исследована частотная зависимость выходного сопротивления генератора (рис. 2).

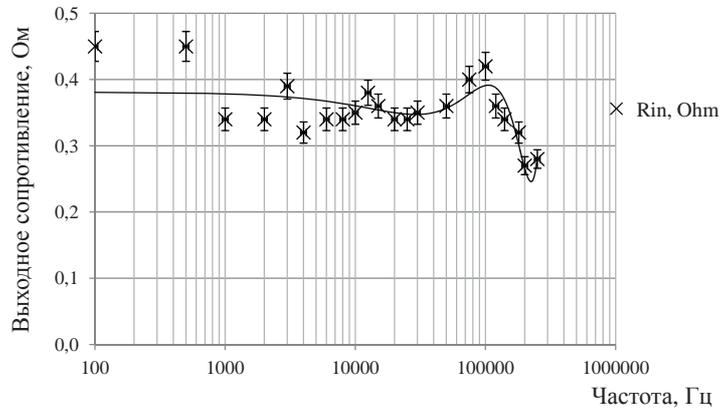


Рис. 2. Зависимость выходного сопротивления от частоты

Как следует из рис. 2, в диапазоне частот от 100 Гц до 240 кГц выходное сопротивление изменяется незначительно и составляет $R_{in} = 0,4 \pm 0,1$ Ом. Таким образом, данный диапазон частот рекомендуется использовать в качестве рабочего.

Измерение тока, стекающего в среду, реализовано по эквивалентной схеме, приведенной на рис. 3. Волнистой линией обозначен генератор ЭДС, активное сопротивление $R_1 = 1$ Ом $\pm 1\%$; R_n — сопротивление среды; V_1 — напряжение на выходе генератора; V_2 — напряжение на плечах диполя.

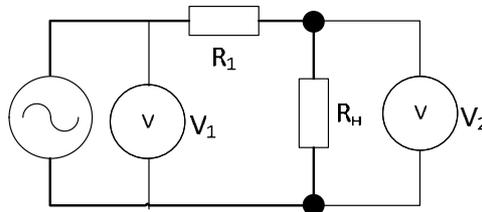


Рис. 3. Принципиальная схема измерения силы тока

Учитывая достаточно низкую рабочую частоту, можно не учитывать реактивную компоненту сопротивления и считать, что ток, протекающий через резистор R_1 , равен току в исследуемой среде. Измерение величины тока в среде позволяет вычислить так называемое кажущееся удельное сопротивление, которое используется в практических задачах геофизики.

Кажущееся удельное сопротивление среды по приближенной формуле:

$$\rho_k = \frac{2\pi r l}{L} \frac{\Delta U}{I},$$

где ΔU — напряжение на плечах диполя, I — ток, стекающий в среду, r — радиус проволоки, из которой изготовлен излучатель, l — величина погружения длиной части излучателя, L — эквивалентная длина проводника в данных расчетах. В расчетах полагалось, что $L = l$, что по нашему мнению принципиально не меняет качественного характера полученных результатов, однако при количественных расчетах должна быть заменена на более точное расстояние.

Методика проведения экспериментов

Измерения разности потенциалов на границе раздела «проводящая среда — воздух» производились при фиксированном положении излучателя и неподвижного зонда. Неподвижный зонд фиксировался на расстоянии 3 мм от точки погружения излучателя. После подачи на электрический разделитель переменной ЭДС замеряются напряжения на плечах диполя и на выходе генератора при помощи осциллографа. По этим данным в дальнейшем определяется ток, стекающий в среду, и при необходимости вычисляется кажущееся сопротивление среды.

Измерения разности потенциалов на границе «воздух — проводящая среда» выполняется в автоматическом режиме при непрерывном перемещении подвижного зонда. Одновременно начинается регистрация показаний нановольтметра с частотой 25 точек за секунду. После достижения наиболее удаленной точки направление движения подвижного зонда изменяется на противоположное, таким образом, за один проход зонда снимаются отсчеты дважды — при прямом и обратном перемещении зонда.

Так как зонд движется по заданной программе с фиксированной скоростью, то легко точно рассчитать текущее положение зонда по прошедшему времени от начала движения и позиционировать соответствующее значение разности потенциалов между подвижным и неподвижным зондами.

Для каждой глубины погружения диполя проводится серия измерения с различными частотами переменной ЭДС в диапазоне от 0,52 до 140,40 кГц.

В связи с тем, что токи при экспериментах малы, а размеры ванны большие, нагревания электролита не происходит, система быстро переходит в стационарный режим. Удельное сопротивление среды в течение эксперимента остается неизменным.

Погрешности измерений определяются конструктивными особенностями экспериментальной установки: источником ЭДС, электроизмерительными приборами, точностью измерения расстояний, сопротивлений контактов, незначительного различия длины соединительных проводов, различных электромагнитных наводок, колебаниями напряжения в системе электропитания, погрешностью составления концентрации раствора электролита, термометра и т. п.

Часть перечисленных источников ошибок дают систематические погрешности, определение систематических погрешностей является отдельной достаточно сложной задачей, которая в настоящей работе не ставилась.

При конструировании и изготовлении экспериментальной установки с целью уменьшения ошибок использовали подводящие провода одного типа и практически одинаковой длины. Применялась соль из одной партии. Относительная погрешность составления концентрации не превышала 5%.

Погрешность измерения интервалов между зондирующими электродами зависит от точности приводного механизма каретки, на которой закреплен подвижный электрод, и оценивается в 5%. Погрешность измерения глубины погружения разделителя диполя также не превышает 5%.

Измерения разности потенциалов производилось селективным нановольтметром, паспортная погрешность которого в зависимости от предела измерения не превышала 10%.

Вычисления случайных погрешностей в настоящей работе не производилось. Однако можно полагать, что качественно величины относительных погрешностей измерений составляют не более 15-20%.

Экспериментальное исследование электромагнитного поля в однородной проводящей среде

Исследование электромагнитного поля заключалось в измерении потенциалов на границе раздела «воздух — проводящая среда» и расчете кажущегося удельного сопротивления при разных частотах электромагнитного поля. Предварительно были выполнены измерения разностей потенциалов на границе раздела «проводящая среда — воздух» при разных частотах и глубинах погружения диполя. Результаты измерений для двух глубин — 0,10 и 0,16 м и частоте 140 кГц, представлены на рис. 4. Маркерами отмечены экспериментальные точки.

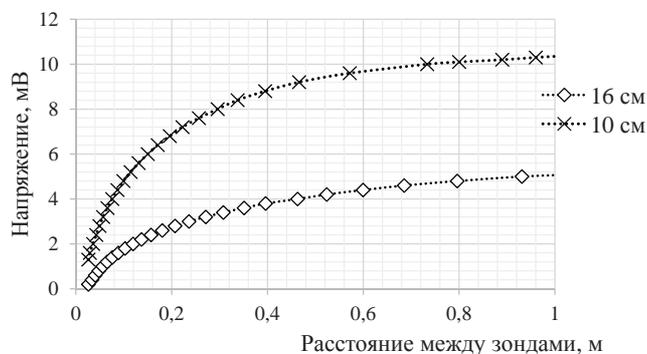


Рис. 4. Разности потенциалов между зондами на границе «воздух — проводящая среда»

Как и следовало ожидать, для однородной среды разность потенциалов монотонно возрастает с увеличением расстояния между зондами, приближаясь к некоторому асимптотическому значению, которое зависит от частоты генерируемого сигнала и глубины погружения излучателя. Характерный вид графиков сохраняется для всех исследованных частот. Вместе с тем при увеличении за-

глубления излучателя и, следовательно, увеличению затухания разности потенциалов на поверхности уменьшаются.

Кажущееся сопротивление однородной среды (рис. 5) для ряда частот и глубин погружения излучателя также изменяется монотонно. Незначительные отклонения экспериментальных точек обусловлены случайными ошибками измерений.

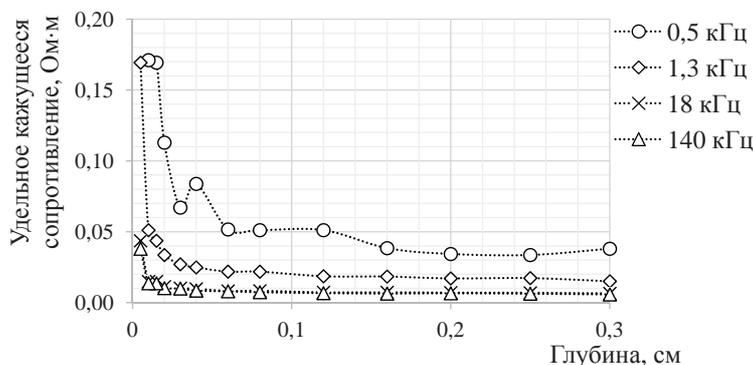


Рис. 5. Зависимость удельного кажущегося сопротивления от глубины погружения диполя

Как следует из рис. 5, по мере увеличения глубины положения излучателя, удельное кажущееся сопротивление среды уменьшается. Такие изменения, в данном случае, можно объяснить тем, что поверхность излучателя, контактирующая с проводящей средой, по мере заглубления увеличивается, что сопровождается увеличением тока при остающемся практически постоянном напряжении на излучателе. Данная зависимость по своей форме аналогична расчетной [9].

Также монотонно изменяется кажущееся удельное сопротивление при увеличении частоты. Зависимость удельного кажущегося сопротивления от частоты представлена на рис. 6.

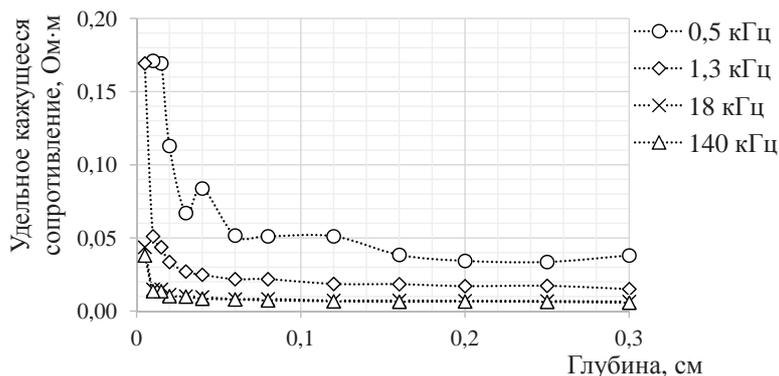


Рис. 6. Зависимость удельного кажущегося сопротивления от частоты генерируемого сигнала для различных глубин погружения

Таким образом, проведенные измерения разностей потенциалов на поверхности раздела «воздух — проводящая среда» и вычисления удельного сопротивления свидетельствуют о пригодности разработанного авторами стенда для проведения масштабных экспериментов по физическому моделированию электромагнитных свойств проводящих сред, в том числе слоистых сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каринский А. Д. Решение осесимметричной прямой задачи теории каротажа при возбуждении поля переменным током // Геофизика. 1998. Вып. 2. С. 20-28.
2. Ким Р. И., Тювеев А. В., Шибков А. Н. Оценка влияния неоднородности морской воды на характеристики электромагнитного поля вблизи дна // Труды Дальневосточного государственного технического университета. 2006. Вып. 142. С. 175-183.
3. Мариненко А. В. Моделирование электромагнитного поля в акваториях морей с различным распределением электропроводности воды по глубине // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. Т. 2. Вып. 2. С. 71-75.
4. Савченко А. О., Савченко О. Я. Электромагнитное поле диполя в анизотропной среде // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 10. С. 118-121.
5. Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. М.: Недра, 1985. С. 267-312.
6. Жданов М. С. Геофизические электромагнитная теория и методы. Elsevier Sci. Амстердам, 2009. 848 с.
7. Нахабцев А. С. Низкочастотная электроразведка линейными источниками гармонического поля. СПб.: Недра, 1992. 360 с.
8. Analog Devices. Техническое описание операционного усилителя AD8531. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8531_8532_8534.pdf (дата обращения 02.09.2011).
9. Михеев В. А., Пилипенко В. А., Асмандияров И. Р. Физическое и математическое моделирование электромагнитного поля в проводящем полупространстве // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. Вып. 10. С. 5-8.

REFERENCE

1. Karinsky, A. D. The solution of the direct problem of the theory of axisymmetric logging with excitation field by alternating current // Geophysics. 1998. Vol. 2. Pp. 20-28.
2. Kim, R. I., Tyuveev, A. V., Shibkov, A. N. Estimation influence of heterogeneity of sea water on the characteristics of the electromagnetic field near the bottom // Proceedings of the Far Eastern State Technical University. 2006. Vol. 142. Pp. 175-183.
3. Marinenko, A. V. Modelling electromagnetic field in the seas with a different distribution of the electrical conductivity of the water in depth // Interexpo Geo-Siberia. 2010. Vol. 2. Issue 2. Pp. 71-75.
4. Savchenko, A. O., Savchenko, O. J. Electromagnetic dipole field in an anisotropic medium // Technical Physics. 2005. Vol. 75. Issue. 10. Pp.118-121.
5. Alpin, L. M., Daev, D. S., Karinsky, A. D. The field theory, used in exploration geophysics. M.: Nedra, 1985. Pp. 267-312.
6. Zhdanov, M. S. Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. Elsevier Sci. Amsterdam, 2009. 848 p.

7. AS Nakhabtsev The low-frequency electromagnetics linear harmonic field sources. St. Petersburg: Nedra, 1992, 360 p.

8. Analog Devices. Datasheet AD8531. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8531_8532_8534.pdf (дата обращения 02.09.2011).

9. Mikheev, V. A., Pilipenko, V. A., Asmandiyarov, I. R. Physical and mathematical modeling of electromagnetic fields in conducting half-space // International Research Journal. 2013. Vol. 10. Pp. 5-8.

Авторы публикации

Асмандияров Ильдар Ринатович — аспирант Тюменского государственного университета, инженер ЗАО «21 век»

Михеев Владимир Александрович — зав. кафедрой радиофизики Физико-технического института Тюменского государственного университета, доцент, кандидат физико-математических наук

Authors of the publication

Ildar R. Asmandiyarov — postgraduate, Tyumen State University, engineer

Vladimir A. Mikheev — Cand. Sci. (Phus.-Math), Associate professor, Head of Radiophysics Department, Physics and Technical Institute Tyumen State University