

ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
МЕТРОЛОГИЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПОЛОЖЕНИЕ
О МѢРАХЪ И ВѢСАХЪ,

Высочайше утвержденное

4-го іюня 1899 года,

съ приложеніемъ

статей Устава Торговаго, кн. III, разд. III, изд. 1893 года, дѣйствующихъ одновременно съ положеніемъ о мѢрахъ и вѢсахъ 4 іюня 1899 года.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Тип. В. Демакова, Новый пер., 7.
1901.



4 июня 1842

Именным Указом было принято «Положение о мерах и весах»

20 мая 1875

Семнадцатью странами, в том числе, Россией, была подписана международная Метрическая конвенция

24 мая 1899

Государственным советом были рассмотрены «Положение о мерах и весах» и новый штат Главной палаты мер и весов

4 июня 1899

Высочайше утверждены «Положение о мерах и весах» и новый штат Главной палаты мер и весов

есть
числ

n

и опре
вета

СИ.
ОЯНН**КИЙ**

тока
я эле
что

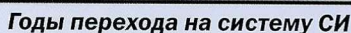
ичес
тура

едини

 V_A, V_B

СВЕТА

2101 pa



№ 3 • (183) • 2023

Научно-технический журнал
Периодичность 6 раз в год
Основан в 1992 году

Издание зарегистрировано
Федеральной Службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых
коммуникаций.

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О РЕГИСТРАЦИИ:

ПИ № ФС77–83368
от 15.06.2022
ISSN 2782–5418 (print)

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической службы»
(ФГБУ «ВНИИМС»)

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической службы»
(ФГБУ «ВНИИМС»)

АДРЕС РЕДАКЦИИ
И ИЗДАТЕЛЯ:

119361, Москва,
ул. Озерная, д. 46,
ФГБУ «ВНИИМС»

тел.: +7 (495) 781-48-70,
E-mail: zipm@vniims.ru

Сайт: https://www.vniims.ru/activities/redakcionno-izdatelskaya-deyatelnost/zakon_and_prikl/

СЛОВО ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Этапы большого пути 4
М. Ю. Прилепко

ЭТАЛОНЫ

Совершенствование государственного первичного
специального эталона ГЭТ 175-2019 5
*В. В. Киселёв, С. Ю. Рогожин, М. В. Гришин,
Т. А. Дубровская, А. А. Куцобин*

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Метрологическое обеспечение электроразведочной аппаратуры
при проведении инженерно-геологических изысканий 14
М. Н. Марченко, И. Н. Модин, А. Ю. Терещенко

ПРАКТИКА И ПРОБЛЕМЫ

Необходимость учета влияния механических звеньев контура
управления на общую точность регулирования АСУ ТП 21
А. А. Коротева, И. С. Галиева, А. Н. Черняев
Аттестация электродинамических вибростендов.
Практические аспекты. Часть 2 27
А. Л. Бондарев

Практическое руководство по определению рисков лабораторий
при выполнении работ в сфере обеспечения единства измерений.
Часть II. Испытания стандартных образцов с целью утверждения типа.
Риски изготовителя и испытателя по обеспечению
прослеживаемости 32
Е. В. Кулябина, В. В. Морозова, В. Ю. Морозов, С. И. Тюрина

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Цифровая система с элементами искусственного интеллекта
для решения задач метрологического обеспечения предприятий
ракетно-космической промышленности 37
А. С. Марталов, А. В. Голега

Исследование погрешности цифровой пространственной фильтрации
текстуры поверхности для линейных фильтров 41
*В. В. Порошин, Д. Ю. Богомолов, В. Г. Лысенко, В. А. Костеев,
Н. А. Табачникова, М. Л. Бабаджанова, К. И. Маликов*

МЕТРОЛОГИ РАЗМЫШЛЯЮТ

Естественный и искусственный интеллект
для стандартизации и метрологии. Часть I 49
Б. Н. Кодесс

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

К 80-летию Бориса Николаевича Кодесса 55

Статьи прошли внешнее и внутреннее рецензирование
С условиями подписки можно ознакомиться на сайте www.vniims.ru

Мнение Редакции может не совпадать с мнением авторов
Редакция не несет ответственности за содержание рекламы

При использовании материалов ссылка на журнал
«Законодательная и прикладная метрология» обязательна

LEGAL AND APPLIED METROLOGY

№ 3 • (183) • 2023

Научно-практический журнал для широкого круга читателей – специалистов в области метрологии, а также для ученых, студентов, профессорско-преподавательского состава вузов, соискателей грантов, ученых степеней кандидатов и докторов наук.

Журнал публикует уникальные авторские материалы в области законодательной и прикладной метрологии, включая статьи международных экспертов – представителей международных организаций – МОЗМ (Международная организация законодательной метрологии), МВБМ (Международное бюро мер и весов), КОOMET (Евразийское сотрудничество государственных метрологических учреждений)

Журнал входит в Перечень ВАК и российский индекс научного цитирования (РИНЦ) научной электронной библиотеки (НЭБ).

Полная электронная копия журнала, начиная с 2002 года размещена в Научной электронной библиотеке https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=8686

Правила для авторов и требования к оформлению статей размещены на сайте журнала и публикуются в журнале.

Подписано в печать 26.06.2023
Формат 60×84 1/8,
6 уч.-изд., 6,5 п.л.,
Тираж 300 экз.
Отпечатано в типографии
ИП «Бендик Д.Н.»
Подписной индекс журнала
47701

EDITOR-IN-CHIEF'S WORD

Stages of the long way 4
M. Y. Prilepko

STANDARDS

Improvement of the state primary special standard GET 175–2019 5
*V. V. Kiselev, S. Yu. Rogozhin, M. V. Grishin,
T. A. Dubrovskaya, A. A. Kucobin*

METROLOGICAL ASSURANCE

Strategic problems in metrology that need to be addressed in the coming decade 14
M. N. Marchenko, I. N. Modin, A. Yu. Tereshchenko

PRACTICES AND CHALLENGES

The need to consider the effect of mechanical links of the control circuit on the overall control accuracy of the ACS 21
A. A. Koroteeva, I. S. Galieva, A. N. Chernyaev
Shaker verification. Practical aspects. Part 2 27
A. L. Bondarev

A practical guide to identifying the risks of laboratories when performing work in the field of ensuring the uniformity of measurements. Part II. Type approval testing of reference materials. Traceability risks for the manufacturer and investigator 32
E. V. Kulyabina, V. V. Morozova, V. Yu. Morozov, S. I. Tyurina

DIGITALIZATION AND COMPUTER TECHNOLOGY

Digital system with artificial intelligence elements for solving the problems of metrological support of rocket and space industry enterprises 37
A. S. Martalov, A. V. Golega
Investigation of the error of digital spatial filtration of surface texture for linear filters 41
*V. V. Poroshin, D. Yu. Bogomolov, V. G. Lysenko, V. A. Kosteev,
N. A. Tabachnikova, M. L. Babadzhanova, K. I. Malikov*

METROLOGISTS PONDER

Smart metrology. Natural and artificial Intellect for Standardization and Metrology. Part I 49
B. N. Kodess

OUR ANNIVERSARIES

To the 80th anniversary of Boris N. Kodess 55

Articles passed external and internal peer review
Subscription terms can be found on the website www.vniims.ru
The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors
The editors are not responsible for the content of advertising
When using materials, a link to the magazine
“Legal and Applied Metrology” is required



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

М. Ю. Прилепко, кандидат технич. наук, доцент Академии метрологии, стандартизации и сертификации, сотрудник ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

М. И. Калинин, кандидат физ.-мат. наук, вед. научн. сотр. ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Л. К. Исаев, профессор, д. т. н., научный руководитель направления по законодательной метрологии, председатель Редсовета, ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

Л. С. Бабаджанов, профессор, д. т. н., главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

А. А. Данилов, профессор, д. т. н., директор пензенского ЦСМ, г. Пенза, Россия

Н. А. Жагора (Республика Беларусь), профессор, д. т. н., главный специалист по метрологии и стандартизации Белорусского государственного института метрологии (БелГИМ), г. Минск, Республика Беларусь

Б. Н. Кодеcss, профессор, д. физ.-мат. н., главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

А. Ю. Кузин, профессор, д. т. н., заместитель директора ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

А. Д. Козлов, профессор, д. т. н., руководитель ГНМЦ ССД, Москва, Россия

В. Г. Лысенко, профессор, д. т. н., главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

С. Г. Семенчинский, д. физ.-мат. н., главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИМС», Москва, Россия

П. А. Тодуа, профессор, д. физ.-мат. н., ФГУП «НИЦПВ», Москва, Россия

А. В. Яшин, д. т. н., руководитель Центра метрологического обеспечения ОКБ АО «НИИАС», Москва, Россия

РЕДАКЦИЯ

Ответственный редактор Д. Ю. Рассмахин

Технический редактор Г. Б. Маравин, к. х. н.

Распространение Л. А. Керсова

EDITOR-IN-CHIEF

M. Yu. Prilepko, PhD in Engineering, associate professor at the Academy of Metrology, Standardization and Certification, employee of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF.

M. I. Kalinin, PhD in Physical-mathematical Sciences, principal scientist of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

L. K. Isaev, D. Sc. of Engineering, Professor, Academic Advisor of the Legal Metrology Department of All-Russian research institute for Metrological service, editorial board chairman, Moscow, Russian Federation

L. S. Babadjanov, D. Sc. of Engineering, Professor, Senior scientist of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

A. A. Danilov, D. Sc. of Engineering, Professor, Director of Penza CSM, Penza, Russian Federation

N. A. Zhagora, D. Sc. of Engineering, Professor, Chief specialist for Metrology and Standardization of Belarusian State Institute of Metrology (BelGIM), Minsk, Republic of Belarus

B. N. Kodecss, D. Sc. of Physical-mathematical Sciences, Professor, Senior scientist of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

A. Yu. Kuzin, D. Sc. of Engineering, Professor, Deputy Director, All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

A. D. Kozlov, D. Sc. of Engineering, Professor, Head of the SNMC SSD, Moscow, Russian Federation

V. G. Lysenko, D. Sc. of Engineering, Professor, Senior scientist of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

S. G. Semenchinskiy, D. Sc. of Physical-mathematical Sciences, Senior scientist of All-Russian research institute for Metrological service, Moscow, Russian Federation

P. A. Todua, D. Sc. of Physical-mathematical Sciences, Professor, Research Center for the Study of Surface Properties and Vacuum, Moscow, Russian Federation

A. V. Yashin, D. Sc. of Engineering, Head of the Center for metrological assurance, Moscow, Russian Federation

Научная статья / Original article

УДК 550.837

Метрологическое обеспечение электроразведочной аппаратуры при проведении инженерно-геологических изысканий

Михаил Николаевич Марченко¹, Игорь Николаевич Модин²,
Александр Юрьевич Терещенко³✉

^{1,2} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-производственный Центр «Геоскан», Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия

a-tereschenko@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены некоторые вопросы стандартизации электроразведочной аппаратуры при проведении работ методом сопротивлений и вызванной поляризации (ВП). Даны рекомендации по методике испытаний аппаратуры для метода ВП. Метрологические работы выполнены сотрудниками ФГУП «ВНИИМС» на при-

мере измерителя электроразведочного низкочастотного ЭНИКС-01 (разработка и производство ООО «ЭМКО», Москва). Приведены как данные справочного и нормативного характера, так и практические рекомендации для производителей и пользователей электроразведочной аппаратуры.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, инженерно-геологические изыскания, электроразведочные работы, электроразведочная аппаратура, метод сопротивлений, метод вызванной поляризации

Metrological assurance of electrical exploration equipment during engineering-geological surveys

Mikhail N. Marchenko¹, Igor N. Modin², Aleksandr Yu. Tereshchenko³✉

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² NPC Geoscan, Moscow, Russia

³ All-Russian research institute for metrological service, Moscow, Russia

a-tereschenko@yandex.ru

Abstract. Some issues of standardization of electrical prospecting equipment in the course of work by the method of resistance and induced polarization (IP) are considered. Recommendations are given on the methodology for testing equipment for the IP method. The metrological work was carried out by the employees of the Federal State

Unitary Enterprise «VNIIMS» on the example of the low-frequency electrical prospecting meter ENIKS-01 (designed and manufactured by EMKO LLC, Moscow). Both data of a reference and regulatory nature, as well as practical recommendations for manufacturers and users of electrical prospecting equipment are given.

Keywords: metrological assurance, engineering geophysical surveys, electrical prospecting works, electrical prospecting equipment, resistance method, induced polarization method

Введение

Производство электроразведочных работ при выполнении инженерно-геологических изысканий регламентируются многими нормативными документами [1–4]. Целью геофизических изысканий является получение информации для проектирования, ремонта, обслуживания зданий и сооружений и, в конечном итоге – для повышения безопасности.

Нормативные документы выдвигают достаточно строгие требования на всех этапах геофизических работ. В работе рассматриваются некоторые организационные и методические вопросы метрологического обеспечения электроразведочных инженерно-геофизических

изысканий методами сопротивлений и вызванной поляризации.

Статья написана по материалам, полученным при испытаниях измерителя электроразведочного низкочастотного ЭНИКС-01.

1. Нормативно-правовая база стандартизации и метрологии электроразведочной аппаратуры

Полевая геофизическая аппаратура внесена в общероссийский каталог продукции (ОКП) и относится к разделу 4314 «Аппаратура и оборудование для полевых геофизических исследований». Законодательством РФ предусматривается только добровольная ме-

трологическая сертификация электроразведочной аппаратуры.

Кроме этого, для электроразведочных генераторов необходимыми являются технические испытания на соответствие требований электробезопасности, пожаробезопасности и экологической безопасности.

На сегодняшний день отсутствуют утвержденные государственные стандарты электроразведочной аппаратуры, при этом присутствуют требования к точности результатов измерений. Точность получаемых данных зависит как от соблюдения методики и техники работ, так и от чувствительности, точности, устойчивости, помехозащищенности применяемых средств измерений [5, 6].

1.1. Основные виды испытаний электроразведочных средств измерений (СИ)

Существует два способа метрологического обеспечения аппаратуры:

- поверка (для утвержденных типов средств измерений),
- калибровка конкретного экземпляра аппаратуры.

Для серийных образцов аппаратуры желательно выбрать первый вариант. В этом случае испытания выполняются специализированными метрологическими организациями по заявке производителя на основе конструкторской и рабочей документации на прибор. По результатам успешных испытаний прибор утверждается как новый тип СИ. Этот тип вносится в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации (Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений). Создается и утверждается описание типа СИ, методика поверки, устанавливается интервал между поверками [7]. Аппаратура, сертифицированная таким образом, поверяется любым аккредитованным метрологическим учреждением на территории РФ. По результатам процедуры для поверяемого экземпляра выдается свидетельство о поверке.

Если испытаний в целях утверждения типа не проводилось, тогда каждый экземпляр прибора по мере необходимости должен проходить процедуру калибровки. Калибровку также может выполнять только аккредитованное метрологическое учреждение. По результатам процедуры выдается сертификат калибровки с указанием неопределенности измерений.

Поскольку общих требований к электроразведочной аппаратуре нет, то значения погрешностей могут быть разными. Ограничивающим фактором здесь является требования к погрешностям полевых наблюдений [3, 4] и контроль со стороны супервайзеров и лиц, проводящих экспертную оценку результатов применения аппаратуры.

1.2. Типовые средства испытаний

Для выполнения метрологических операций применяется специальное оборудование. Для работы с электроразведочными приборами метрологами наиболее часто используются следующие виды эталонных мер и средств измерений:

- магазины электрического сопротивления P4834;
- магазины емкости P5025;
- калибраторы многофункциональные (универсальные) Fluke 5520A, 9100;
- генераторы сигналов произвольной формы 33220A;
- мультиметры 3458A;
- осциллографы цифровые (погрешность коэффициента отклонения $\pm 1,5\%$);
- частотомеры электронно-счетные вычислительные ЧЗ-64;
- аттенюаторы.

Все используемое оборудование должно быть поверено (калибровано) в установленном порядке.

Некоторой проблемой испытаний электроразведочной аппаратуры является тот факт, что многие эталонные приборы отвечают требуемой точности *только для частот более 10 Гц*, а многие электроразведочные приборы работают на меньших частотах.

1.3. Метрологические параметры электроразведочной аппаратуры, подлежащие контролю

Согласно требованиям, все применяемые в электроразведке средства измерений должны подвергаться контролю [1]. Электроразведочная аппаратура включает в себя генераторные и измерительные устройства, программное обеспечение, питающие и приемные линии, электроды разных типов. Зачастую генераторы и измерители объединяют в виде единого аппаратного или аппаратно-программного комплекса.

Основные метрологически значимые параметры электроразведочных генераторов следующие:

- диапазон рабочих частот;
- сила выходного тока (или напряжение);
- диапазоны допустимых нагрузок;
- форма сигнала (крутизна фронтов, соотношения гармоник и некоторые другие).

Для электроразведочных измерителей список основных метрологически значимых параметров значительно шире:

- чувствительность;
- полоса пропускания первичных преобразователей;
- входное сопротивление;
- диапазон рабочих частот;
- полоса пропускания измерительного тракта;
- напряжение постоянного и переменного тока;
- фазовые сдвиги между гармоническими сигналами различного происхождения;
- углы наклона эллипса измеряемого электромагнитного поля;
- реальные и мнимые компоненты электромагнитного поля или их отношение;
- времена стробирования;

В разнообразии параметров аппаратуры, имеющих непосредственное влияние на конечный результат геофизических измерений, выбор корректных мето-

дов метрологических испытаний приборов является задачей нетривиальной [5, 6].

Как говорилось выше, в РФ отсутствуют государственные стандарты по этим видам средств измерений. Основным критерием выбора производителя пределов погрешностей измеряемых параметров являются нормативы максимальной погрешности полевых наблюдений [3, 4] – как правило, это $\pm 5\%$ для кажущегося сопротивления и $\pm 10\%$ для вызванной поляризации. Принято считать, что суммарная аппаратная погрешность генератора и измерителя для метода сопротивлений не должна превышать $\pm (2+3)\%$. Оставшиеся $2+3\%$ являются запасом на методические погрешности полевых работ.

1.4. Метрологически значимое программное обеспечение (ПО)

В состав современной аппаратуры входят микроконтроллеры, управляемые встроенным ПО, или используется внешнее ПО для регистрации и цифровой обработки сигналов, выполнения измерений. Такое программное обеспечение является метрологически значимым и требует регистрации и контроля. Процедура сертификации ПО громоздка. По возможности производители стараются избежать этих сложностей.

На практике считается, что ПО отдельной регистрации и контролю не подлежит, если:

- ПО реализовано аппаратно, заносится в программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) приборов предприятием-изготовителем;
- ПО не доступно для пользователя, увидеть наименование встроенного ПО, его версию или номер не представляется возможным.

2. Испытания аппаратуры для методов сопротивлений и вызванной поляризации

2.1. Метод сопротивлений

Стандартным для метрологов способом при испытаниях комплекта электроразведочной аппаратуры является разделение комплекта на отдельные устройства – генератор и измеритель. Испытания генератора выполняют по методикам для генераторов тока/напряжения, а испытания измерителя выполняют как для микровольтметра. Эталонные приборы согласуются по частотам и амплитудам с испытуемыми. Метод испытаний – метод прямых измерений или метод непосредственного сличения. Такой подход является методически наиболее простым, но предполагает достижения сравнительно высоких точностей и стабильности в работе генератора и измерителя по отдельности.

Сложность представляет выполнение испытаний приборов для амплитуд эталонных сигналов менее 10 мВ. Такие амплитуды недоступны для большинства калибраторов на частотах менее 10 Гц. В этом случае могут применяться аттенюаторы или делители напряжения на магазинах сопротивлений.

Некоторые разработчики заявляют в качестве контролируемого параметра отношение измеренного

измерителем напряжения к силе выходного тока генератора. В этом случае испытания выполняют на эталонных магазинах сопротивлений. Недостатком такого способа поверки является необходимость работы только поверенной парой генератор-измеритель. Результаты, полученные с использованием генераторов и измерителей от разных производителей или из разных комплектов аппаратуры, будут метрологически некорректными.

Иногда разработчики уходят от некоторых требований к генераторам путем автоматического непрерывного измерения выходного тока. Обычно такие схемы применяют при использовании многоканальных измерителей. В этом случае значимыми являются только испытания измерительной части комплекса. Примером аппаратуры описанного класса являются станции электротомографии (Syscal, Омега-48, Скала-64 и др.). Контролируемые параметры многоканальных комплексов требуют отдельного рассмотрения.

2.2. Методические аспекты испытаний аппаратуры для метода вызванной поляризации

Измерения методом вызванной поляризации (ВП) горных пород обычно выполняют одним из четырех способов:

- измерение кривой спада или заряда во временной области;
- измерение фазового сдвига $\Delta\varphi_{ВП}$ между первыми гармониками выходного тока генератора и напряжения переменного тока на входе измерителя (ИНФАЗ-ВП);
- амплитудно-частотный способ – измерение напряжения переменного тока на разных частотах (PFE – процентно-частотный эффект):

$$PFE = \frac{A_{(\omega_{низкая})} - A_{(\omega_{высокая})}}{A_{(\omega_{низкая})}} \cdot 100\% \quad (1)$$

- фазово-частотный способ – измерение дифференциального фазового параметра (ДФП) напряжения переменного тока на входе измерителя:

$$\begin{aligned} ДФП &= \frac{\omega_3 \cdot \varphi_1 - \omega_1 \cdot \varphi_3}{\omega_3 - \omega_1} = \\ &= \frac{3 \cdot \omega_1 \cdot \varphi_1 - \omega_1 \cdot \varphi_3}{3 \cdot \omega_1 - \omega_1} = \frac{3 \cdot \varphi_1 - \varphi_3}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_{(\omega_{низкая})}$ – амплитуда гармоники на низкой частоте, В;

$A_{(\omega_{высокая})}$ – амплитуда гармоники на высокой частоте, В. Низкая частота обычно выбирается в интервале от 0,5 до 2 Гц, а высокая в интервале от 4 до 20 Гц; ω_1, ω_3 – циклические частоты первой и третьей гармоник меандра, φ_1, φ_3 – фазы первой и третьей гармоник меандра на входе измерителя.

Для выполнения испытаний измерительной аппаратуры ВП во временной области и в варианте ИНФАЗ-ВП необходимо создать установку-схему, имитирующую процесс ВП. Для этой цели можно применять интегрирующую RC цепь с известной постоянной времени

кривой спада. Один из возможных вариантов схемы представлен на рис. 1.

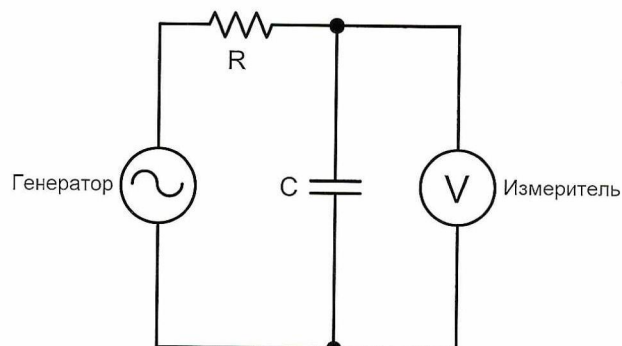


Рис. 1. Вариант схемы эксперимента для моделирования сигнала ВП с применением функционального генератора
Fig. 1. Variant of the experimental scheme for modeling the IP signal using a function generator

Возбуждение схемы выполняется функциональным генератором переменного напряжения в форме однополярных прямоугольных импульсов (меандр с постоянной компонентой) или напряжения синусоидальной формы (рис. 2).

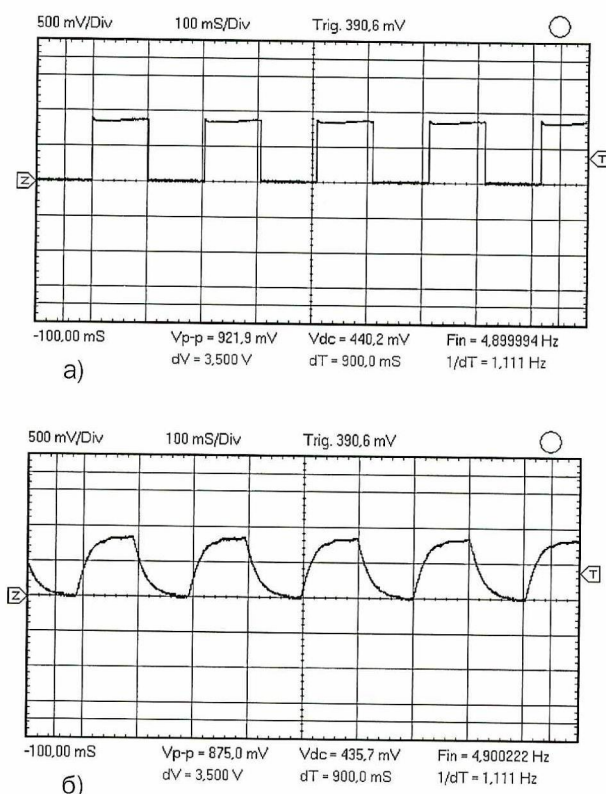


Рис. 2. Осциллограммы напряжений:
а) на выходе генератора; б) на входе измерителя для RC-цепи, изображенной на рис. 1
Fig. 2. Voltage oscillograms:
a) at the generator output; b) at the input of the meter for the RC circuit shown in fig. 1

Для получения значимых значений сдвига фаз необходимо выполнить условие: постоянная времени цепи должна быть сравнима с периодом входного меандра.

Сложность работы с описанной установкой заключается в обеспечении высоких точностей и стабильности элементов схемы, минимизации влияния паразитных емкостей и индуктивностей соединительных линий и проводов.

Одним из возможных приемов для борьбы с нестабильностью параметров RC-цепи является сравнение показаний испытуемого прибора, подключенного к описанной схеме, с показаниями эталонного СИ.

ВП во временной области

Испытания аппаратуры для ВП во временной области выполняются аналогично аппаратуре для метода сопротивлений. Единственное отличие – необходимо дополнительно проверять временные задержки и интервалы, используемые при измерениях кривой спада и значения напряжения ВП.

Кривая спада получается с помощью схемы, представленной на рис. 1, возбуждаемой генератором напряжения в форме однополярных прямоугольных импульсов. В этом случае кривая спада описывается выражением:

$$\Delta U_{ВП}(t) = U_{генератора} \cdot e^{-t/RC} \quad (3)$$

где $U_{генератора}$ – амплитуда переменного выходного напряжения, В;

t – время задержки, с;

ω – циклическая рабочая частота генератора, рад/с;

R – номинальное значение электрического сопротивления резистора схемы на рис. 1, Ом;

C – номинальное значение электрической емкости конденсатора схемы на рис. 1, Ф.

Результаты измерений испытуемой аппаратуры сравниваются с данными эталонного осциллографа или с результатами, полученными по формуле (3).

ВП в модификации ИНФАЗ-ВП

Испытания аппаратуры для ВП в модификации ИНФАЗ-ВП можно выполнять с помощью эталонных средств измерений сдвига фаз. В данном случае измерению подлежит сдвиг фаз между током генератора и сигналом измерителя.

Сдвиг фаз получается с помощью схемы, представленной на рис. 1. и возбуждаемой генератором переменного напряжения гармонической формы. В этом случае фазовый сдвиг $\Delta\phi_{ВП}$ между первыми гармониками выходного тока генератора и напряжением переменного тока на входе измерителя (технология ИНФАЗ-ВП) зависит от частоты меандра и описывается выражением:

$$\Delta\phi_{ВП} = -\arctg(\omega \cdot R \cdot C) \cdot \frac{360}{2\pi}, \quad (4)$$

Результаты измерений испытуемой аппаратуры сравниваются с данными эталонного осциллографа или фазометра или с результатами, полученными по формуле (4).

ВП в модификации амплитудно-частотных измерений

Испытания аппаратуры для ВП в модификации амплитудно-частотных измерений выполняются различными способами для разных технологий выполнения измерений.

Для технологии с отдельным измерением напряжения переменного тока на разных частотах и последующим вычислением PFE испытания выполняются полностью аналогично аппаратуре для метода сопротивлений.

При измерении PFE на многочастотном сигнале с анализом различных гармоник в качестве эталона можно использовать сигнал в форме высокоточного меандра, задаваемого прецизионным генератором или калибратором. Для такого сигнала известен спектральный состав и значения амплитуд разных гармоник. Меандр подается на вход схемы, приведенной на рис. 1. При этом амплитудно-частотная характеристика описывается выражением:

$$U_{\text{вых.}} = \frac{U_{\text{вх.}}}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{вых.}}$ – выходное напряжение генератора, В;

$U_{\text{вх.}}$ – напряжение на входе измерителя, В.

Из этого выражения несложно получить выражение для PFE для первой и третьей гармоники. Результаты измерений испытуемой аппаратуры сравниваются с результатами вычислений.

ВП в модификации фазово-частотных измерений

Для испытания аппаратуры для ВП в модификации фазово-частотных измерений применяют высокоточные генераторы сигналов произвольной формы. Таким генератором можно сформировать сигнал, содержащий первую и третью гармоники и задать сдвиг фаз этих гармоник. Результаты измерений испытуемой аппаратурой сравниваются с эталонным (заданным в генераторе) сдвигом фаз. Пример таких испытаний для измерителя ЭНИКС-01 приведен в разделе 3.

Другим способом является получение сдвига фаз между гармониками с помощью схемы, представленной на рис. 1. и возбуждаемой генератором напряжения в форме однополярных прямоугольных импульсов. В этом случае дифференциальный фазовый параметр согласно уравнениям (2) и (4) описывается выражением:

$$ДФП = \frac{\arctg(3 \cdot \omega \cdot R \cdot C) - 3 \cdot \arctg(\omega \cdot R \cdot C)}{2} \cdot \frac{360}{2\pi}. \quad (6)$$

Результаты измерений испытуемой аппаратуры сравниваются с результатами вычислений по формуле (6).

3. Пример испытаний аппаратуры для метода сопротивлений и вызванной поляризации

В качестве иллюстрации изложенных положений приведем фрагменты испытаний измерителя электрораз-

вочного низкочастотного ЭНИКС-01. Испытания в целях утверждения типа средства измерений «Измерители электроразведочные низкочастотные ЭНИКС-01» проводились в ФГУП «ВНИИМС». Измерители внесены в Госреестр СИ РФ под рег. № 53873-13.

Измеритель ЭНИКС-01 позволяет выполнять измерения:

- напряжения постоянного тока;
- напряжения переменного тока;
- дифференциального фазового параметра напряжения переменного тока.

Примечание: под напряжением переменного тока понимается сигнал прямоугольной формы типа «меандр».

3.1. Определение погрешности измерений напряжения переменного тока на частотах менее 10 Гц

Определение относительной погрешности измерений напряжения переменного тока на частотах менее 10 Гц для измерителя ЭНИКС-01 выполнялись с помощью генератора сигналов специальной формы 33220А. Использование калибраторов для этих целей невозможно, поскольку рабочая полоса частот калибраторов начинается от 10 Гц.

Паспортные данные генератора 33220А не позволяют использовать его в качестве источника эталонных сигналов. Для контроля выходное напряжение переменного тока генератора измерялось одновременно мультиметром 3458А и измерителем ЭНИКС-01. Измерительные приборы соединялись параллельно. За эталонные значения принимались результаты измерений мультиметром 3458А. Форма сигнала генератора – меандр.

Относительная погрешность определялась по формуле:

$$\delta_U = \frac{U_X - U_0}{U_0} \cdot 100, \quad (7)$$

где U_X – показания испытуемого прибора, В;

U_0 – эталонные значения, В.

3.2. Определение погрешности измерений напряжения переменного тока на частотах более 10 Гц

Определение относительной погрешности измерений напряжения переменного тока на частотах 19,53 Гц для измерителя ЭНИКС-01 выполнялись с помощью калибратора многофункционального Fluke 5720А.

Форма сигнала калибратора – синус (гармонический сигнал). Выход калибратора соединяется с входом измерителя ЭНИКС-01.

Номинальным значением выходного напряжения калибратора является эффективное значение. Поэтому для оценки результатов наблюдений измерителем ЭНИКС-01 в номиналы выходных напряжений калибратора необходимо ввести поправочный коэффициент $\sqrt{2} \cdot \frac{\pi}{4}$, равный, приблизительно 1,1107.

3.3. Определение погрешности измерений дифференциального фазового параметра

Определение абсолютной погрешности измерений дифференциального фазового параметра для измерителя ЭНИКС-01 выполнялись с помощью генератора сигналов специальной формы 33220А (частота дискретизации 50 МГц).

Генератором формировался сигнал, содержащий первую и третью гармоники (соотношения амплитуд 3:1, соответственно). Задавались сдвиги фаз этих гармоник ($-30, -20, -10, 0, +10, +20, +30$ градусов). Выход генератора соединялся со входом измерителя ЭНИКС-01.

3.4. Результаты испытаний

Испытания измерителя ЭНИКС-01 показали, что:

- относительная погрешность измерений напряжения переменного тока во всей полосе рабочих частот не превышает $\pm 0,26\%$;
- абсолютная погрешность измерений дифференциального фазового параметра не превышает $\pm 0,1$ градуса.

По результатам испытаний в документацию (в т.ч. в технические условия (ТУ), описание типа) для измерителей ЭНИКС-01 внесены следующие значения параметров:

- пределы допускаемой относительной погрешности измерений напряжения переменного тока: $\pm 0,5\%$;
- пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений дифференциального фазового параметра: $\pm 0,2$ градуса.

4. Метрологические критерии при сравнении электроразведочной аппаратуры

При работе различных приборов на одном объекте возникает задача взаимной калибровки моделей аппаратуры и полученных результатов. Для решения таких вопросов проводятся сравнительные испытания приборов. Обычно такие исследования выполняются на геофизических полигонах, или эталонных профилях, организованных непосредственно на объекте. Основная задача такого рода испытаний – определение величины расхождения результатов измерений для всех используемых приборов и определение точности съемки.

Результаты сравнительных испытаний ложатся в основу внутренних документов контроля.

Для сравнения технических возможностей электроразведочных измерителей для метода сопротивлений можно использовать параметры, характеризующие:

- возможность выполнения измерений малых сигналов (менее 10 мкВ);
- возможность выполнения измерений в условиях электромагнитных помех.

Данные параметры критическим образом влияют как на скорость выполнения работ, так и на качество получаемых результатов.

4.1. Пример сравнения электроразведочной аппаратуры

Авторами выполнено сравнительное исследование измерителей двух типов от разных производителей, выполняющих аналогичные функции.

Эксперимент выполнен в условиях высокого уровня промышленных помех. Измерения выполнялись с помощью дипольной осевой установки с разносами 00» от 1 до 22 метров. Для минимизации влияния сторонних факторов, все используемые электроды забивались заранее и во время измерений не двигались. Возбуждение поля выполнялось генератором АСТРА-100 на частоте 4,8828125 Гц.

В ходе полевого эксперимента выполнены две серии измерений. На первом этапе производились измерения кривой зондирования на большом токе в питающей линии. Результаты наблюдений обоими приборами расходились менее чем на 1%, в силу чего результаты наблюдений в виде dU/I принимались за «эталон» (см. рис. 3).

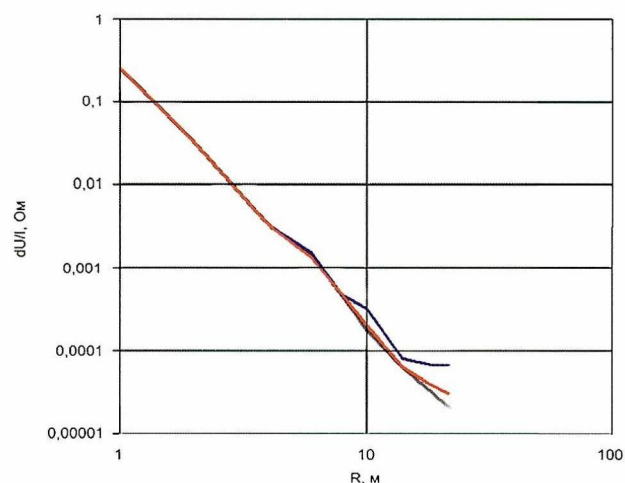


Рис. 3. Графики зависимостей dU/I от разноса:

черный график – результаты измерений на больших токах в питающей линии установки; красный и синий графики – результаты измерений с малыми токами в питающей линии измерителем 1 (красный график) и измерителем 2 (синий график)

Fig. 3. Graphs of dependences of dU/I on spacing: black graph – results of measurements at high currents in the supply line of the installation; red and blue graphs – the results of measurements with low currents in the supply line by meter 1 (red graph) and meter 2 (blue graph)

На втором этапе выполнялись повторные измерения при малом токе генератора. При увеличении разноса установки 00» и при малом токе амплитуда полезного сигнала становилась малой, появлялась возможность оценить качество работы сравниваемых приборов при низком отношении сигнал/шум. Вычислялось отклонение результатов измерений dU/I от «эталона». Результаты наблюдений приведены на рис. 4.

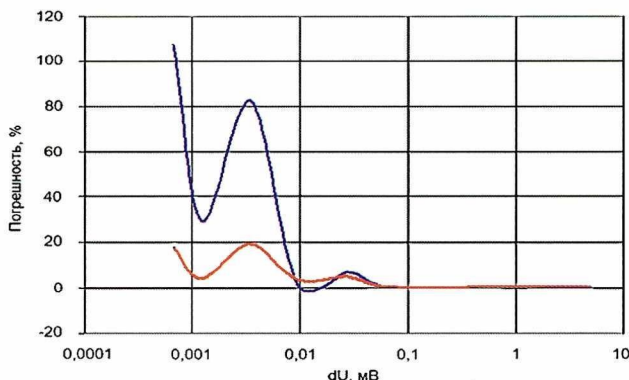


Рис. 4. График зависимости относительной погрешности измерений напряжения переменного тока от величины полезного сигнала для измерителя 1 (красный график) и для измерителя 2 (синий график)

Fig. 4. Graph of the relative error of AC voltage measurements versus the value of the useful signal for meter 1 (red graph) and for meter 2 (blue graph)

На рисунках 3 и 4 видно, что на сигналах более 10 мкВ оба прибора ведут себя идентично. Различия наблюдаются на меньших амплитудах. Значительный рост погрешностей для измерителя 1 наблюдается на сигналах, приблизительно, менее 3 мкВ, а для измерителя 2 на сигналах менее 8 мкВ.

Выводы

Несмотря на то, что электроразведочная аппаратура не подлежит обязательной сертификации в РФ, на практике приходится прилагать значительные усилия для контроля получаемых данных при проведении геофизических наблюдений.

Наличие аппаратуры, прошедшей испытания, позволяет, в некоторой степени, избежать проблем с эксплуатацией приборов и обоснованием получаемых результатов съемки.

Список источников

1. СП 11-105-97 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ.
2. СП 11-105-97 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований.
3. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка/М-во геологии СССР. -Л.:1984.
4. РСН 64-87 Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства.

Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка.

5. Прихода А.Г., Новоселова Т.И., Толстиков А.С. Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение геофизических и сопровождающих их геодезических работ //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 4. – С. 241–246.
6. Жданев О.В., Зайцев А.В., Лобанков В.М. Метрологическое обеспечение аппаратуры для геофизических исследований //Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 667 – 677.
7. Федеральный закон Российской Федерации № 102-ФЗ от 26 июня 2008 г. «Об обеспечении единства измерений».

References

1. SP 11-105-97 Code of practice. Engineering geological site investigations for construction. Part I (In Russ.).
2. SP 11-105-97 Code of practice. Engineering geological site investigations for construction. Part VI (In Russ.).
3. Electrical prospecting instructions: Nazemnaja jelektrorazvedka, skvazhinnaja jelektrorazvedka, shahtno-rudnichnaja jelektrorazvedka, ajerojelektrorazvedka, morskaja jelektrorazvedka/M-vo geologii SSSR. -L.: 1984 (In Russ.).
4. RSN 64-87 Republican construction norms. Inzhenernye izyskaniya dlja stroitel'stva. Tehnicheskie trebovaniya k proizvodstvu geofizicheskikh rabot. Jelektrorazvedka (In Russ.).

5. Prihoda AG, Novoselova TI, Tolstikov AS. Standartizacija, sertifikacija i metrologicheskoe obespechenie geofizicheskikh i soprovozhdayushhih ih geodezicheskikh rabot //Interjekspo Geo-Sibir'. – 2006. – Т. 4. – S. 241–246 (In Russ.).
6. Zhdaneev OV, Zajcev AV, Lobankov VM Metrologicheskoe obespechenie apparatury dlja geofizicheskikh issledovanij //Zapiski Gornogo instituta. – 2020. – Т. 246. – S. 667–677. (In Russ.).
7. Federal law of 26.06.2008 N 102-FZ «Ob obespechenii edinstva izmerenij» (In Russ.).

Дата принятия: 15.05.2023