

Г. А. ШТАМБЕРГЕР
(Новосибирск)

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

В комплексе различных методов геофизических исследований важное место занимает электроразведка и в особенности аэроэлектроразведка — высокопроизводительный и эффективный метод решения поисковых и картировочных задач. Электроразведка предназначена для получения сведений о верхнем слое земли по его удельной проводимости. Поскольку геологические объекты, представляющие поисковый интерес, являются пассивными в энергетическом отношении, то для их проявления необходимо возбудить их, воздействуя физическим полем. В качестве таких воздействий в электроразведке используются различные по своему спектральному составу, направлению распространения, поляризации и интенсивности электромагнитные поля. Эти поля могут создаваться искусственно или иметь естественное происхождение.

Наиболее широкое применение в практике геофизических исследований имеют методы, базирующиеся на измерении пространственных и временных характеристик полей, изменяющихся по синусоидальному закону, чаще всего на одной из фиксированных частот инфразвукового и звукового диапазонов [1—3]. Поскольку в этом случае форма возбуждающего поля задана, то в зависимости от решаемых геоэлектрических задач варьируется направление возбуждающего поля, т. е. для возбуждения геологических объектов используются различные его пространственные компоненты H_x , H_y или H_z . Измерению также подлежит одна из этих пространственных компонент вторичного или суммарного поля. В методе вращающегося магнитного поля используются одновременно две какие-либо пространственные компоненты поля с фазовым сдвигом между ними, равным $\pi/2$ [4]. В методе переходного процесса (становления) возбуждение искомым геологическим объектом осуществляется полем, имеющим импульсный характер и изменяющимся с определенной периодичностью, а измерению подлежит импульсная реакция среды в моменты отсутствия возбуждающего поля. Возбуждающее поле и в этом случае может быть задано определенными пространственными характеристиками, но кроме этого имеется возможность изменением скважности периодического несинусоидального поля изменять его спектральный состав. Поле реакции можно рассматривать как периодический несинусоидальный сигнал с формой, в первом приближении подобной экспоненте.

В обоих рассмотренных случаях первичное поле создается искусственно, и поэтому его характеристики нам известны. Иное дело, когда для целей электроразведки используются поля естественного происхождения, повлиять на формирование которых нет возможности. Эти поля, как известно [5, 6], формируются за счет различных природных явлений и поэтому имеют случайный характер, в первом приближении подобный тепловому шуму.

Таким образом, используемые в настоящее время в электроразведке поля имеют либо гармонический характер, либо представляют собой периодические несинусоидальные колебания, либо, наконец, являются случайным процессом. Поэтому в зависимости от характера возбуждающих полей необходимо выбирать и соответствующие измеряемые величины с учетом информационных возможностей этих величин, технической реализации систем и их помехозащищенности. Однако независимо от характера подлежащие измерению поля преобразуются с помощью соответствующих приемников магнитной составляющей поля в напряжение, и поэтому при анализе принципов построения измерительных систем правомочно ограничиваться рассмотрением возможности измерения характеристик различных видов напряжений.

В методах, использующих возбуждающее поле, изменяющееся по синусоидальному закону, измерению подлежат либо модуль и фаза, либо активная и реактивная составляющие напряжения на выходе приемника поля (преобразующего напряженность поля в напряжение) в системе координат, положение которой определяется напряжением, пропорциональным току, возбуждающему первичное поле. При построении измерительных систем для электроразведки первостепенное внимание уделяется вопросам выделения полезных сигналов, так как измеряемые величины, как правило, по уровню соизмеримы с уровнем шумов аппаратуры и внешних помех. Поскольку создание фильтров с очень высокой добротностью для звукового диапазона частот представляет собой трудную задачу, то основным путем, используемым для выделения полезного сигнала, является синхронный прием. В силу этого обстоятельства основными измеряемыми параметрами являются синфазная и квадратурная составляющие, а определение значения модуля и фазы осуществляется путем соответствующих алгебраических операций над синфазной и квадратурной составляющими. Однако такое простое решение получаем только благодаря тому, что спектр исследуемого сигнала состоит из одной единственной составляющей, и поэтому сравнение каких-либо характеристик двух таких напряжений не представляет особых трудностей. Иное дело, когда сигнал, несущий информацию об объекте исследования, содержит гамму спектральных составляющих и невозможно выделить такое напряжение, которое может быть использовано для образования координатной системы. Здесь, вообще говоря, могут иметь место два случая: 1) измеряемое напряжение является детерминированным периодическим несинусоидальным, и ряд дискретных значений частот не является бесконечным; 2) измеряемое напряжение представляет собой случайный процесс, принимаемый в дальнейшем стационарным. В первом случае имеется возможность использования специального напряжения сложной формы для определения числовых интегральных характеристик исследуемого напряжения, во втором случае такой возможности уже нет [7]. Поэтому для исследования как периодических несинусоидальных, так и непериодических детерминированных и случайных напряжений предпочтительнее измерять такие величины, как коэффициенты корреляции — меры ко- или контрвариантности между двумя напряжениями, одно из которых является измеряе-

мым, а второе в процессе эксперимента принимается в качестве опорного.

Важнейшими из таких характеристик, используемых для решения геофизических задач, по нашему мнению, будут являться вещественный $r_{\text{в}}$ и мнимый $r_{\text{м}}$ коэффициенты корреляции:

$$r_{\text{в}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u_x(t) u_0(t) dt;$$

$$r_{\text{м}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u_x(t) u_0^k(t) dt,$$

а также модуль и фазовый угол комплексного коэффициента корреляции:

$$r = \sqrt{r_{\text{в}}^2 + r_{\text{м}}^2}; \quad \varphi = \text{arc tg } \frac{r_{\text{м}}}{r_{\text{в}}},$$

где $u_x(t)$, $u_0(t)$ — сравниваемые напряжения;
 $u_0^k(t)$ — напряжение, ортогональное $u_0(t)$ во всем рабочем спектре частот.

К настоящему времени в методе становления исследованию подлежала вся кривая переходного процесса, по которой определялись такие ее параметры, как наклон и длительность. Хотя кривая переходного процесса несет всю информацию об электрических свойствах исследуемого объекта, при интерпретации используется только часть этой информации. Поскольку мы в праве рассматривать возбуждающее поле и импульсную реакцию среды как некоторые периодически повторяющиеся процессы, то приведенные выше характеристики с успехом могут быть использованы в качестве измеряемых и в методе становления. Нам кажется, что измерение подобных характеристик целесообразно, так как позволяет упростить измерительную аппаратуру и облегчает борьбу с некоррелированными помехами.

В методе, базирующемся на использовании естественных электромагнитных полей, как уже указывалось [8], выделение полезных сигналов достигается в основном путем использования корреляционного метода измерения, поэтому рассмотренные характеристики представляют наибольший интерес. Правда, поскольку возбуждающее поле не является детерминированным процессом, то необходимо измерять нормированные коэффициенты корреляции, т. е. использовать относительные методы измерений.

Таким образом, нетрудно заметить, что во всех случаях основными измеряемыми величинами являются осредненные значения произведения двух сигналов, выражаемые как нормированные или ненормированные коэффициенты корреляции. Последнее замечание не противоречит тому факту, что в случае синусоидальных возбуждающих полей измеряется активная и реактивная составляющие, которые могут быть получены путем вычисления скалярного произведения двух векторов с последующим делением результата на действующее значение одного из них.

Исходя из сказанного, еще раз отметим, что во всех случаях, когда измерению подлежат сигналы на фоне соизмеримых помех, целесообразно определять коэффициенты связи, выражаемые как активная или

реактивная составляющие или вещественный и мнимый коэффициенты корреляции, и, если понадобится, путем соответствующих операций вычислять модуль и фазовый сдвиг. В дальнейшем задача будет сводиться к разработке рациональных принципов построения устройств для измерения этих характеристик.

Несмотря на большое многообразие вариантов аппаратуры для индуктивных методов разведки, в их основу положены некоторые частные случаи метода непосредственной оценки. К устройствам такого рода относятся измерители различных характеристик — интенсивности (амплитудных, действующих, средних значений), фазовых и модульно-фазовых, разности и отношения каких-либо двух величин. Так, например, для измерения средних значений синусоидальных напряжений предназначается электроразведочный микровольтметр МКЭВ-1 [9]; аппаратура для двухчастотной индуктивной электроразведки ДИЭР базируется на измерении разности модулей двух напряжений и представляет собой дифференциальный вольтметр [10]; в аппаратуре аэроразведки методом бесконечно длинного кабеля, индукции, вращающегося магнитного поля и др. [1, 4, 11, 12] используются фазочувствительные вольтметры, дифференциально-фазочувствительные вольтметры и логометрические устройства; различные измерители коэффициентов корреляции применяются в аппаратуре для метода естественных электромагнитных полей [13].

Несмотря на ряд достоинств, измерительные системы, в основу которых положен метод непосредственной оценки, нельзя считать оптимальными. Значительно лучшие результаты можно получить, используя вместо метода непосредственной оценки нулевой компенсационный метод, позволяющий упростить измерительные системы и повысить их метрологические характеристики. К сожалению, в настоящее время компенсационные методы измерений используются в практике геофизического приборостроения явно недостаточно. Объяснить подобную ситуацию можно тем, что разработка устройств, использующих нулевые методы для измерения переменных напряжений и токов, в особенности периодических несинусоидальных и непериодических, сталкивалась с определенными затруднениями.

Как известно [14], в случае измерения синусоидальных напряжений (токов) цепь уравнивания необходимо привести к состоянию, характеризующемуся определенным отношением векторов двух напряжений (токов)

$$W = we^{j\theta} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{aX + b}{cX + d},$$

где a, b, c, d — известные, в общем случае комплексные коэффициенты; X — измеряемая величина.

Это условие является необходимым и достаточным для измерения комплексной величины с помощью цепи уравнивания независимо от ее структуры, так как оно функционально связано с измеряемой величиной. Действительно, поскольку дробно-линейное преобразование конформно отображает все точки плоскости W в точки плоскости X , то, зная W , можно в результате обратного преобразования

$$X = \frac{-Wd + b}{Wc - a}$$

определить X .

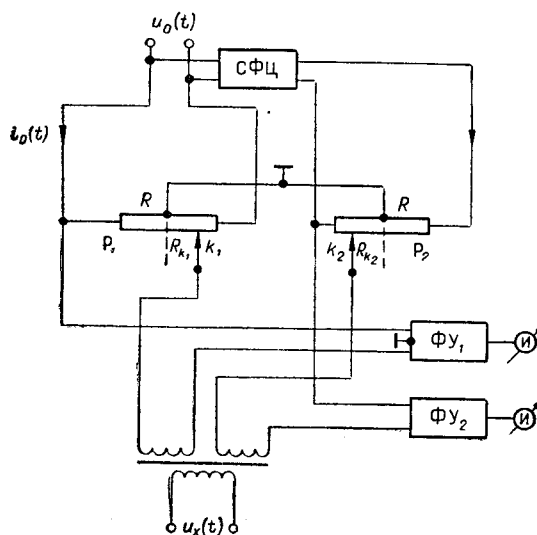
Однако поставленная задача может быть решена и путями, основанными на независимом решении отдельных скалярных уравнений. При этом в ряде случаев структура измерительной цепи допускает составление соотношения с одним неизвестным, в результате чего обеспечивается возможность раздельного независимого измерения отдельных составляющих комплексной величины. При такой постановке измерительная цепь может быть использована в двух режимах измерения — векторном и скалярном. Режим измерения, при котором в цепи устанавливается заранее заданное соотношение между векторами напряжений (токов), т. е. между модулями и фазовыми углами этих напряжений (токов), называется векторным. Приведение измерительной цепи к векторному режиму измерения возможно только в том случае, когда формы обоих сравниваемых напряжений совершенно идентичны, поэтому этот режим используется преимущественно при измерении параметров синусоидальных напряжений (токов).

Под скалярным режимом измерения понимается режим, при котором условия, накладываемые на измерительную цепь, характеризуются либо только модулем, либо только фазовым углом вектора W .

Приведение цепи уравнивания к векторному режиму измерения всегда позволяет определить составляющие искомой комплексной величины. При этом, однако, выполнение векторного условия ($W = \text{const}$) требует одновременной регулировки двух известных параметров цепи и результат может быть получен только после выполнения обеих регулировок. Квазиуравновешенные и уравновешенные цепи в векторном режиме измерения, требующие для получения результата одновременного выполнения некоторых модульных и фазовых соотношений между напряжениями (токами) в цепи, характеризуются сравнительно сложной техникой эксперимента. Это обстоятельство и явилось, по-видимому, причиной того, что компенсационные методы измерений не получили в наземной и аэроразведке того распространения, которого они заслуживают.

Скалярный режим измерения, достигаемый регулировкой одного переменного параметра при определенной структуре цепи и определенных условиях, обеспечивающих раздельное измерение составляющих комплексной величины, характеризуется исключительной простотой процесса измерения. Процесс измерения параметров комплексной величины с помощью цепей уравнивания, используемых в скалярном режиме измерения, столь же прост, как и при измерении компенсаторами постоянных напряжений (токов).

Однако это не единственное достоинство цепи, используемой в скалярном режиме измерения. Анализ обобщенного уравнения цепи показывает, что в случае частотонезависимых, вещественных коэффициентов, входящих в это уравнение, использование цепи в скалярном режиме измерения легко



допускает переход к измерению характеристик периодических несинусоидальных и непериодических детерминированных и случайных величин. Рассмотрим эту возможность на примере прямоугольно-координатного компенсатора (см. рисунок) [15]. В состав компенсатора входят: два реохорда P_1 и P_2 , каждый с общим сопротивлением R ; спектральная фазовращающая цепь СФЦ, обеспечивающая ортогональность напряжений на зажимах реохордов во всем рабочем спектре частот, и два фазовых указателя $FУ_1$ и $FУ_2$, представляющих собой в случае измерения синусоидальных напряжений обычные фазочувствительные устройства, показания которых равны нулю при квадратуре входных напряжений, а при измерении параметров несинусоидальных напряжений — множительные устройства с интегрирующими звеньями на выходе. Оба сравниваемых напряжения $u_0(t)$ и $u_x(t)$ включаются симметрично относительно нулевых потенциалов. Пусть вначале сравниваемые напряжения являются синусоидальными. В этом случае показания указателей будут определяться зависимостями:

$$\alpha_1 = K \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{R_{k_1}}{R} U_0 \sin \omega t + U_x \sin (\omega t + \varphi) \right] \frac{1}{2} U_0 \sin \omega t dt;$$

$$\alpha_2 = K \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{R_{k_2}}{R} U_0 \cos \omega t + U_x \sin (\omega t + \varphi) \right] \frac{1}{2} U_0 \cos \omega t dt .$$

Регулировкой положения скользящих контактов реохордов k_1 и k_2 добиваются нулевых показаний указателей. В этот момент справедливыми будут равенства:

$$U_0 U_x \cos \varphi = \frac{R_{k_1}}{R} U_0^2;$$

$$U_0 U_x \sin \varphi = \frac{R_{k_2}}{R} U_0^2$$

или

$$U_x \cos \varphi = U_0 \frac{R_{k_1}}{R} = I_0 R_{k_1};$$

$$U_x \sin \varphi = U_0 \frac{R_{k_2}}{R} = I_0 R_{k_2}$$

и, таким образом, синфазная и квадратурная составляющие определяются по значению рабочего тока и части сопротивления между средней точкой реохорда и соответствующим движком. Очевидно, что поскольку обе регулировки выполняются независимо друг от друга, то этот случай соответствует раздельному измерению составляющих комплексного напряжения. Схема, изображенная на рисунке, может быть также с успехом применена для измерения параметров несинусоидальных напряжений. Так, если, например, сравниваемые напряжения являются периодическими, то в момент нулевых показаний указателей можно записать:

$$\sum_{n=p-1}^{\infty} U_{xp} U_{0n} \cos \varphi_n = \frac{R_{k_1}}{R} \sum_{n=1}^{\infty} U_{0n}^2;$$

$$\sum_{n=p-1}^{\infty} U_{xp} U_{0n} \sin \varphi_n = \frac{R_{k_2}}{R} \sum_{n=1}^{\infty} U_{0n}^2.$$

В левой части последних выражений имеются ненормированные вещественный и мнимый коэффициенты корреляции между $u_x(t)$ и $u_0(t)$, в правой — квадрат действующего значения напряжения, принятого в качестве опорного. В более общем случае — стационарных случайных напряжений эти коэффициенты будут определяться через дисперсию напряжения $u_0(t)$ и показания делителей.

Таким образом, на этом примере мы попытались продемонстрировать возможность использования компенсационных методов для измерения характеристик как синусоидальных, так и несинусоидальных напряжений (токов). Подобные цепи, называемые нами квазикомпенсационными, обладают рядом существенных достоинств. К ним можно отнести: 1) обеспечение более высокой точности измерения по сравнению с устройствами, в основу которых положен метод непосредственной оценки; 2) простоту измерительного процесса и сравнительно легкую возможность его автоматизации; 3) получение результатов как в аналоговой, так и цифровой формах; 4) возможность создания измерительных устройств астатического и статического типов.

Благодаря этим преимуществам квазикомпенсационные цепи могут быть рекомендованы в качестве основы при разработке новых измерительных систем для электроразведки методами с использованием синусоидальных, периодических несинусоидальных возбуждающих полей и полей естественного происхождения, имеющих случайный характер.

Одной из весьма трудоемких операций, связанных с получением информации о геологическом объекте, является обработка полевых материалов, которая еще до настоящего времени выполняется вручную. Получается противоречие: с одной стороны, применение авиации позволяет значительно ускорить проведение геофизической съемки, а с другой — существующие способы обработки замедляют процесс получения результатов. Поэтому вопросы автоматизации обработки полевых материалов приобретают важное значение. Эта обработка может выполняться с помощью либо специализированных, либо универсальных вычислительных машин. В обоих случаях полевая информация должна быть представлена соответствующим числовым кодом. Применение квазикомпенсационных методов, легко допускающих получение информации в числовом виде без применения преобразователей аналог — код, упрощает и эту задачу.

В заключение автор хочет особо отметить роль чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандеева в постановке исследований в области электроразведки и руководстве ими и выразить ему искреннюю благодарность за постоянное внимание к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Современное состояние и перспективы развития аэроэлектроразведочных методов. — Геофизическая аппаратура, вып. 24. Л., «Недра», 1965.
2. К. Б. Карандеев, Д. С. Даев, Э. В. Пасько, Г. А. Штамбергер. Принципы построения аппаратуры для геофизической разведки методами переменного тока. — Изв. АН СССР, серия геофизическая, 1964, № 2.
3. Ю. В. Якубовский. Индуктивный метод электроразведки. М., Госгеолтехиздат, 1963.
4. Ю. Б. Шауб. Основы аэроэлектроразведки методом вращающегося магнитного поля. Л., Гостоптехиздат, 1963.
5. Н. Г. Клейменова. Современные представления о природе высокочастотных вариаций электромагнитного поля Земли (1 гц—1 кгц). — Изв. АН СССР, серия геофизическая, 1963, № 12.

6. Н. Г. Клейменова. Некоторые замечания о природе естественных электромагнитных вариаций в диапазоне 100—1000 гц.— Изв. АН СССР, серия «Физика Земли», 1965, № 2.
7. Г. А. Штамбергер. О характеристиках переменных напряжений, подлежащих измерению.— Автометрия, 1967, № 3.
8. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, Г. А. Штамбергер. О принципах построения измерительной аппаратуры для электроразведки методом естественных электромагнитных полей.— Автометрия, 1965, № 4.
9. В. В. Рогачев, А. А. Флакман. Электроразведочный микровольтметр.— В сб. «Геофизическое приборостроение», вып. 12. Л., Гостоптехиздат, 1962.
10. Д. Г. Левченко. Аппаратура двухчастотной индуктивной электроразведки.— Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
11. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. О разработках Института автоматики и электрометрии в области аппаратуры для индуктивных методов разведки.— Тр. межвузовской конференции по индуктивным методам рудной геофизики. Л., «Недра», 1964.
12. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Измерительные информационные системы для геофизических исследований.— Вестник АН СССР, 1965, № 2.
13. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Аэро- и наземный варианты аппаратуры для геофизических исследований с использованием естественных электромагнитных полей.— ОНТИ ВИЭМС. Доклад на семинаре ВДНХ, 1964, № 34.
14. Г. А. Штамбергер. Измерительные цепи уравнивания переменного тока.— ИВУЗ, Приборостроение, 1964, т. VII, № 4.
15. Г. А. Штамбергер. Измерение компонент комплексного напряжения с помощью квазикомпенсационной цепи.— Приборостроение, 1964, № 3.

*Поступила в редакцию
11 мая 1967 г.*