

О. Н. Моисеев, М. К. Попов, Н. П. Легенькова

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ АМТ-ЗОНДИРОВАНИЙ

Разработанные на кафедре физики Земли СПбГУ образцы аппаратуры для осуществления глубинного электромагнитного зондирования земной коры в интервале периодов $0,2-10^{-3}$ с нашли применение во многих регионах [1-4]. Результаты проведенных аппаратурно-методических разработок, а также геофизических исследований позволили осуществить дальнейшую модернизацию аппаратуры и методики обработки экспериментальных данных.

Основными неудобствами, которые сопровождают как полевые работы, так и камеральную обработку, при проведении зондирований в аудиодиапазоне, можно считать ручную обработку записей и сравнительно большой расход электроэнергии для питания самописца. Эти недостатки легко устраняются путем перехода от регистрации четырех компонент естественного электромагнитного поля (ЕЭМП) к регистрации значений модуля импеданса среды Z_α и угла поляризации электрического поля α :

$$Z_\alpha = \frac{E}{H}, \quad \alpha = \text{arctg} \left(\frac{E_x}{E_y} \right),$$

где E и H — амплитуды горизонтальных векторов ЕЭМП поля после узкополосной фильтрации на частотах f_a , равные

$$E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}, \quad H = \sqrt{|H_x|^2 + |H_y|^2},$$

E_x, E_y, H_x, H_y — амплитуды поля по осям регистрации x и y соответственно.

Преобразование компонент ЕЭМП в упомянутые выше величины осуществляется аппаратурно-электронными преобразователями. При этом количество данных, подлежащих регистрации, резко сокращается, так как оценки величин Z_α, α проводятся только в момент фиксации аппаратурой достаточно выраженных по интенсивности импульсов. Как показано в работе [5], при поляризации электрического поля близкой к линейной, этих трех значений будет достаточно, чтобы построить полярные диаграммы модуля главной компоненты тензора импеданса, определить направление осей неоднородности среды и значения главных компонент тензора вдоль них. Подобная методика неоднократно применялась при анализе данных аудимагнитотеллурического зондирования (АМТЗ) и оправдала себя [1, 4, 6]. Эти данные поступают в среднем один раз в десять секунд и фиксируются на твердые накопители в аналоговой или цифровой форме, что требует минимальных энергетических затрат.

Следуя такой методике, авторам удалось разработать и построить блок преобразования и обработки компонент поля ЕЭМП, который подключается к выходам станции АМТЗ и обеспечивает получение перечисленных выше величин: Z_α, φ и α .

Рассмотрим схему блока преобразования более подробно. Для этого вспомним, что на выходах станции АМТЗ в момент прихода импульсов действуют четыре синусоидальных сигнала: U_1, U_2, U_3, U_4 , на частоте 4,5 Гц балансно промодулированные E_x, E_y, H_x, H_y -компонентами ЕЭМП [3]. Фазовые сдвиги между колебаниями несущих частот каналов отображают фазовые сдвиги между компонентами. Низкое значение несущей частоты 4,5 Гц было выбрано с целью экономии диаграммной

ленты для самописца. Однако преобразовывать и обрабатывать сигналы технически удобнее на более высоких несущих частотах. Поэтому поступающие на вход блока преобразования и обработки сигналы переносятся в область более высокой частоты, равной 500 Гц (рис. 1). Все четыре сигнала, соответствующие компонентам ЕЭМП, на несущей частоте $f=4,5$ Гц через открытые ключи 1 K_1, K_2, K_3, K_4 поступают на накопительные ячейки 2, выполненные по схеме синхронного фильтра [3]. Опрос емкостей синхронных фильтров осуществляется с частотой $f = 500$ Гц, чем и достигается перенос спектров сигналов в высокочастотную область. Значения фаз сигналов при этом сохраняются. Далее преобразованные сигналы $\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \tilde{U}_3, \tilde{U}_4$ поступают на регулируемые оператором фазосдвигающие цепи 3, где вносятся дополнительные фазовые сдвиги между несущими E_x и E_y , а также между несущими H_x и H_y сигналами такие, чтобы результирующий фазовый сдвиг между одноименными компонентами как для электрической, так и для магнитной составляющей был бы равен 90° . Затем сигналы одноименных компонент попарно складывают на сум-

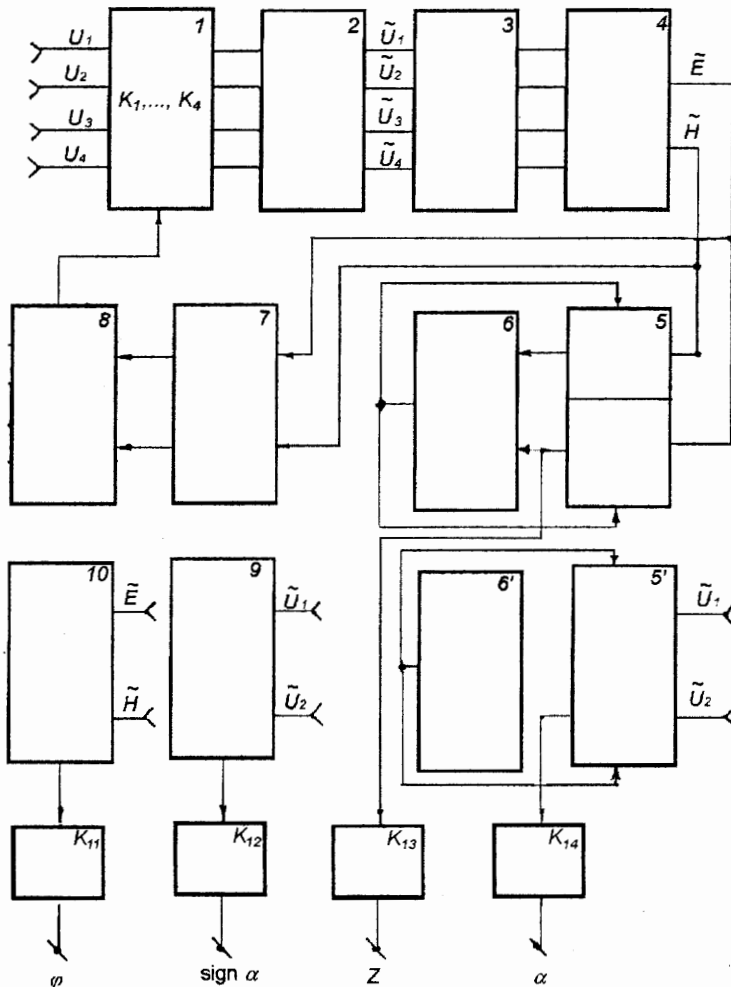


Рис. 1. Блок-схема приставки к АМТ станции (объяснение в тексте).

маторах 4. При условии, что наблюдаемые поля близки к линейно поляризованным, а разности фаз $\psi_2 - \psi_1$ и $\psi_4 - \psi_3$ составляют 90° , получаем:

$$\begin{aligned} E_x \sin(2\pi f_0 t + \psi_1) + E_y \sin(2\pi f_0 t + \psi_2) &= E \sin(2\pi f_0 t + \psi_1 + \alpha) = \tilde{E}, \\ H_x \sin(2\pi f_0 t + \psi_3) + H_y \sin(2\pi f_0 t + \psi_4) &= -H \sin(2\pi f_0 t + \psi_3 + \tilde{\alpha}) = \tilde{H}, \\ E_x = E \cos \alpha, \quad E_y = E \sin \alpha, \quad H_x = H \sin\left(\frac{\pi}{2} + \tilde{\alpha}\right), \quad H_y = H \cos\left(\frac{\pi}{2} + \tilde{\alpha}\right), \end{aligned}$$

α — угол между осью Y и направлением вектора электрической составляющей, совпадающим с направлением прихода грозового импульса в диапазоне АМТЗ. Угол поляризации магнитного поля $\tilde{\alpha}$ в общем случае может отличаться от α или быть равным ему, если направление прихода волны совпадает с направлением одной из осей полярной импедансной диаграммы.

В результате описанных преобразований на выходах усилителей 5 действуют сигналы несущей частоты 500 Гц с огибающими, пропорциональными амплитудам E и H . Далее эти сигналы усиливаются в режиме автоматической регулировки усиления обратно пропорционально уровню компоненты H . Для этого сигналы компоненты H на выходе усилителя 5 детектируются, сглаживаются блоком 6 и подаются одновременно на оба управляющих входа усилителя 5. Благодаря этому амплитуда сигналов H -компоненты на выходе остается неизменной при вариации амплитуд на выходе усилителей в пределах $30 \div 40$ дБ. В свою очередь компонента E усиливается тем слабее, чем интенсивнее компонента H , и наоборот, т. е. обеспечивается преобразование вида $Z = E/H$ с достаточной степенью точности в широком диапазоне вариаций амплитуд E и H компонент. Для получения напряжений, пропорциональных модулям импедансов, сигналы E дополнительно линейно детектируются в блоке 5, и поэтому на его выходе действует напряжение, пропорциональное модулю импеданса Z .

Поскольку практическую ценность представляет не текущее значение Z , соответствующее формальному отношению E к H , а лишь те значения, которые соответствуют всплескам электромагнитного поля от источника грозовой активности достаточной интенсивности, превосходящие шумовой фон, применена схема амплитудной селекции. Как видно из рисунка, сигналы с выходов сумматоров поступают на фильтры 7, которые пропускают сигналы не ниже E_{\min} и H_{\min} . Таким образом, для всех этих выбранных уровней на выходах фильтров появляются сигналы в виде отрезков искаженных синусоид, которые усиливаются усилителями-ограничителями, детектируются, сглаживаются и поступают на схему совпадений 8. При поступлении сигналов на оба входа схемы совпадений вырабатывается сигнал управления τ , который приобретает некоторую задержку на RC -цепи и поступает на ключи K_1, K_2, K_3, K_4 и закрывает их. Это приводит к резкому увеличению постоянных времени накопительных ячеек и одновременному отключению поступающих на них сигналов, т. е. происходит фиксация амплитуд сигналов, приходящих на входы блока обработки от импульса электромагнитных волн достаточной интенсивности. Постоянная времени ячеек при закрытых ключах выбирается порядка нескольких десятков секунд. При этом на выходе блока 5 удерживается в течение этого времени практически неизменяемое напряжение, пропорциональное значению Z импеданса, которое фиксируется и считывается визуально со стрелочного или цифрового индикатора, либо записывается в цифровом коде на твердые накопители.

Оценка угла α осуществляется при помощи выше описанной процедуры, лишь с тем отличием, что на другую пару управляемых усилителей 5 поступают не сигналы \tilde{E} и \tilde{H} компонент, а сигналы \tilde{U}_1, \tilde{U}_2 , и вычисляются отношения E_x/E_y либо

E_y/E_x . Таким образом, на другом индикаторе при поступлении импульсов ЕЭМП на входы станции АМТЗ фиксируются оценки угла поляризации электрического поля. Так как углы поляризации на импедансных полярных диаграммах для первого, третьего и второго, четвертого квадрантов неразличимы, оценки углов поляризации даются в интервале $\pm 180^\circ$. Знак углов ($\text{sign}\alpha$) оценивается с помощью третьего индикатора, подключенного к выходу фазового детектора 9, на входы которого подаются сигналы \tilde{U}_1 и \tilde{U}_2 . Если угол поляризации оказывается в первом или третьем квадранте, то сигналы практически остаются синфазными и на выходе фазового детектора вырабатывается положительный сигнал. Наоборот, для углов во втором и четвертом квадрантах сигналы противофазны и на выходе детектора действуют отрицательные сигналы.

С помощью блока преобразования и обработки компонент ЕЭМП можно получить оценку аргумента импеданса. Аргумент импеданса φ измеряется по величине запаздывания несущих \tilde{E} и \tilde{H} компонент с помощью фазового детектора 10. Оценка определяется разностью отсчетов, получаемых при подаче на выходы станции синфазных синусоидальных калибровочных сигналов, и отсчетов, получаемых при приеме импульсов ЕЭМП на каждой из анализируемых частот f_a

$$\varphi = \varphi_k - \varphi_a,$$

где φ_k и φ_a — показания фазометра при калибровке и приеме поля.

Для того чтобы не отвлекать внимание оператора и не фиксировать результаты обработки слабых и шумовых сигналов, все индикаторы подключаются к своим источникам (блокам) только на время действия сигналов τ управления, т. е. на время фиксации четко выраженных интенсивных всплесков ЕЭМП. Это достигается за счет срабатывания ключей K_{11} , K_{12} , K_{13} , K_{14} , которые управляются сигналами от блока 8. Таким приемом производится автоматическая отбраковка бесполезной, шумовой информации.

Прибор выполнен на микросхемах 140 и 176 серий, имеет габариты $300 \times 200 \times 150$ мм, массу 3 кг, питается от двух источников постоянного тока ± 6 В, потребляет ток 200 мА. Прибор прошел расширенные лабораторные и полевые испытания

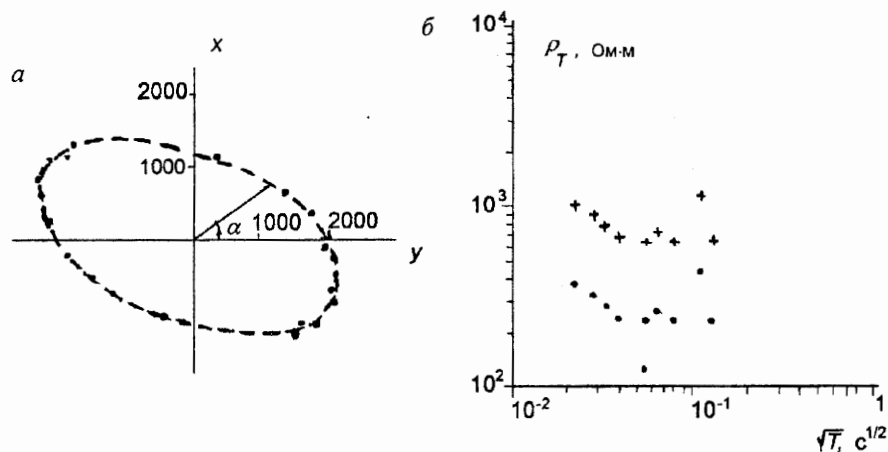


Рис. 2. Результаты опробования АМТ станции в пункте Смирново (объяснение в тексте).

летом 1994 г. на участке Выборг — Приозерск.

В качестве примера на рис. 2, а приведена полярная импедансная диаграмма, полученная по полевым данным в пос. Смирново на частоте 1300 Гц, на рис. 2, б — кривые ρ_T для направлений, соответствующих максимальному и минимальному значениям импеданса. Длительность наблюдений во всем интервале частот не превышает 3 ч. Ограниченность времени натурных наблюдений не позволила получить полный набор оценок Z_α . Однако практически удалось выделить значения Z_{\max} и Z_{\min} для всех периодов T . Для увеличения надежности результатов необходимо проводить повторные серии наблюдений через 2–3 ч. Построить кривые ρ_T в интервале периодов $T = (40 \text{ Гц})^{-1} \div (5 \text{ Гц})^{-1}$ не удалось по причине высокого уровня помех в выше упомянутом пункте.

Приведенные результаты совпадают с результатами ручной обработки и свидетельствуют об эффективности и надежности разработанного макета аппаратуры, позволяющего в полевых условиях получить данные о важных геофизических параметрах среды непосредственно в процессе проведения наблюдений.

Указатель литературы

1. Ковтун А. А., Моисеев О. Н., Попов М. К. АМТ-исследования в зоне Ладожской аномалии электропроводности. М., 1994. Деп. в ВИНТИ 5.0686, № 4.86В.
2. Комолов В. И., Моисеев О. Н., Попов М. К. Усовершенствование станции для проведения аудиоманнитотеллурических зондирований и некоторые результаты применения в Северном Казахстане. Деп. в ВИНТИ. № 5265 – В90 от 5.10.90.
3. Комолов В. И., Моисеев О. Н., Савельев А. А. Полевой экспресс-анализатор естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне КНЧ // Геофизическая аппаратура. 1985. Вып. 84. С. 58–66.
4. Ковтун А. А., Моисеев О. Н., Успенский Н. И. Проводящие зоны в земной коре на Балтийском щите по данным МТЗ в диапазоне 1–100 Гц // Вопросы геофизики. 1986. № 32. С. 3–17.
5. Ковтун А. А. Магнитотеллурические исследования слоисто-неоднородных структур // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 11. С. 1663–1667.
6. Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы (по данным МТЗ). Л., 1989. 284 с.