

Н. Л. Миронцов

О методе импульсного индукционного каротажа*(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)*

Запропоновано новий принцип індукційного каротажу, заснований на живленні зонда імпульсами постійної амплітуди, що дозволяє вимірювати не тільки питомий електричний опір породи, а й її магнітну проникність. Цей принцип дає змогу виключити необхідність використання компенсаційних котушок, а також значно знизити дію температури на каротаж.

Принцип работы аппаратуры низкочастотного индукционного каротажа (ИК) имеет ряд особенностей, которые существенно ограничивают практические возможности ее применения: необходимость компенсации “прямого” поля (неточность такой компенсации приводит к существенным погрешностям измерения); зависимость результата измерения от температуры в скважине (в силу линейного температурного расширения, изменяется длина между катушками зонда и, как следствие, — измеряемый сигнал); неудовлетворительное, не всегда отвечающее требованиям геофизического исследования скважин, качество получаемого материала (излишняя глубина исследования метода не позволяет достаточно детально изучить ближнюю зону пласта) [1–3].

В настоящем сообщении предложен метод импульсного питания зонда, позволяющий обеспечить достаточную точность решения задачи определения геоэлектрических параметров околоскважинного пространства и создать аппаратуру, лишенную основных недостатков низкочастотного ИК. Метод основан на питании генераторных катушек зонда импульсами постоянной амплитуды, в отличие от применяемого при низкочастотном ИК режиме питания переменной ЭДС постоянной амплитуды.

Рассмотрим взаимодействие зонда ИК, состоящего из двух катушек (генераторной и приемной), оси которых совпадают, с элементарным кольцом (ЭК) породы сопротивления R (Г. Г. Доль, 1957), но в режиме импульсного питания. Если в момент времени t_0 к генераторной катушке приложить ЭДС величины ε_0 (сила тока в генераторной катушке $I_{\Gamma} \sim t$), то относительно тока в ЭК ($I_{\text{ЭК}}$) и тока в приемной катушке (I_{Π}) можем записать [4]:

$$M_{\Gamma} \frac{dI_{\Gamma}}{dt} = \varepsilon_0, \quad (1)$$

$$M_{\Gamma\text{ЭК}} \frac{dI_{\Gamma}}{dt} + M_{\text{ЭК}} \frac{dI_{\text{ЭК}}}{dt} + I_{\text{ЭК}} R = 0, \quad (2)$$

$$M_{\Gamma\Pi} \frac{dI_{\Gamma}}{dt} + M_{\text{ЭК}\Pi} \frac{dI_{\text{ЭК}}}{dt} + M_{\Pi} \frac{dI_{\Pi}}{dt} = 0, \quad (3)$$

где M_{Γ} , M_{Π} и $M_{\text{ЭК}}$ — индуктивности генераторной, приемной катушек и ЭК соответственно; $M_{\Gamma\Pi}$, $M_{\text{ЭК}\Pi}$, $M_{\Gamma\text{ЭК}}$ — коэффициенты взаимной индукции между этими катушками. Решив систему (1)–(3), найдем значение силы тока в приемном контуре:

$$I_{\Pi} = \frac{\varepsilon_0}{M_{\Pi} M_{\Gamma}} \left(\frac{M_{\text{ЭК}\Pi} M_{\Gamma\text{ЭК}}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{M_{\text{ЭК}}} t} \right) - M_{\Gamma\Pi} t \right). \quad (4)$$

Величина (аналогично классическому ИК измеряется не сила тока, а ЭДС [2]) измерительного контура будет равна

$$\varepsilon_{\Pi} = -\frac{\varepsilon_0}{M_{\Pi}M_{\Gamma}} \left(R \frac{M_{\text{ЭК}\Pi}M_{\Gamma\text{ЭК}}}{M_{\text{ЭК}}^2} e^{-\frac{R}{M_{\text{ЭК}}}t} + M_{\Gamma\Pi} \right), \quad (5)$$

характер изменения которой во времени зависит от УЭС ЭК.

Кроме того, измерение не зависимости ЭДС $\varepsilon_{\Pi}(t)$ от времени, а ее производной по времени позволяет избавиться от постоянной составляющей сигнала, что принципиально невозможно в классическом ИК (тем самым избавиться от необходимости “компенсации” прямого поля и введения температурной калибровки). Это, в свою очередь, позволяет использовать двухкатушечные зонды, во-первых, с более пространственно локализованным геометрическим фактором и, во-вторых, с меньшей глубиной [1], что, соответственно, позволяет более детально исследовать радиальное распределение УЭС пласта (в цилиндрической системе координат), в том числе и ближней зоны. Более того, вертикальный геометрический фактор двухкатушечного зонда симметричен [5], что значительно упрощает интерпретацию (решение обратной задачи) данных каротажа.

Таким образом, в отличие от классического ИК, в котором амплитуда сигнала для каждого измерения — величина постоянная (именно она является информативным результатом измерения), в предложенном методе исследуется зависимость принимаемого сигнала от времени, для каждого положения зонда по оси скважины. Применение метода возможно и для геометрии расположения катушек, предусматривающей компенсацию прямого поля в низкочастотной реализации. В этом случае характеристики пространственного разрешения будут аналогичны характеристикам соответствующих зондов в низкочастотной реализации, но погрешности, связанные с точностью измерения полезного сигнала малой величины от среды на фоне намного большего по значению прямого сигнала, будут отсутствовать.

Следует заметить, что амплитуда измеряемого сигнала (5) зависит только от величины сопротивления ЭК, в то время как постоянная времени переходного процесса — от УЭС и магнитной проницаемости, что, вообще говоря, позволяет измерять нам обе эти величины.

Особенностью метода может стать ограничение на возможность измерения ЭДС в измерительном контуре со сколь угодно малым интервалом времени. Однако современное состояние измерительной техники свидетельствует о надежном измерении УЭС в пределах 1–300 ом · м, что перекрывает диапазон определения УЭС низкочастотным ИК [1, 6].

Таким образом, предложенный метод позволяет: расширить диапазон измерения УЭС по сравнению с диапазоном низкочастотного метода ИК при меньшей погрешности измерения; использовать зонды любой геометрии (без ограничения, наложенного необходимостью компенсировать прямое поле), в частности двухкатушечные зонды, т. е. применять на практике зонды с ненулевым сигналом от ближней зоны, что предоставляет возможность надежно определять параметры ближней зоны пласта; измерять не только УЭС породы, но и ее магнитную проницаемость.

Автор выражает признательность за обсуждение предложенного принципа импульсного ИК д-ру физ.-мат. наук В. Н. Шуману и канд. техн. наук Р. С. Челокьяну.

1. Плюснин М. И. Индукционный каротаж. – Москва: Недра, 1968. – 140 с.
2. Кауфман А. А. Теория индукционного каротажа. – Москва: Наука, 1965. – 236 с.
3. Дажнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – Москва: Недра, 1972. – 368 с.

4. Тамм И. Е. Основы электричества. – Москва: Наука, 1976. – 616 с.
5. Anderson B. I. Barber T. D. Induction logging. – Paris: Schlumberge print, 1996. – 45 p.
6. Anderson B. I. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. – Paris: Schlumberge print, 2001. – 377 p.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 22.10.2009

M. L. Myrontsov

On the method of electromagnetic-pulse logging

A new principle of electromagnetic-pulse logging which is based on feeding the probe by pulses with constant amplitude and allows one to see not only the resistivity of rock but also its magnetic permeability is proposed. This principle allows one to eliminate the necessity to use compensative coils and to decrease the temperature influence on logging.