

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАРОТАЖ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Мосин А.П.¹, Могилатов В.С.²

¹ – Компания Бэйкер Хьюз, Новосибирск,

² – Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск.

Аннотация: представлены самые первые результаты по исследованию возможностей метода переходных процессов (или метода зондирования становлением) применительно к каротажу в вертикальных и наклонных скважинах. Авторы развивают математическое обеспечение и приводят сравнительные расчеты для электромагнитного каротажа во многослойных средах для гармонического и импульсного режимов.

Ключевые слова: электромагнитный каротаж, метод переходных процессов, горизонтальный магнитный диполь, вертикальный магнитный диполь, математическое моделирование.

В наземной геоэлектрике метод зондирования становлением электромагнитного поля явился большим шагом вперед, позволив решать гораздо более тонкие задачи, чем это было возможно при использовании частотного метода. Это связано с возможностью измерения сигнала при отключенном источнике в широком диапазоне времен (следовательно, частот). В скважинных электромагнитных исследованиях ситуация несколько иная и мотивация к переходу на импульсный режим существенно меньшая. Во-первых, приемно-питающая установка выполняется очень точно, в жестком варианте, и степень компенсации первичного поля очень высокая, хотя источник и не отключается. Во-вторых, реализация импульсного режима, в котором в силу малых масштабов исследования (зондирования) приходится рассматривать наносекундные диапазоны времен, технически сложна.

Тем не менее, зондирования становлением (ЗС) остаются одной из перспектив развития электромагнитного каротажа. Возможности в гармоническом режиме компенсировать первичное поле все же ограничены (хотя бы температурной нестабильностью), и это ограничивает чувствительность метода. В режиме же становления, под землей, где нет электромагнитных помех, можно добиться необычайной чувствительности (глубинности) за счет регистрации весьма малых сигналов. Укажем еще на одно важное преимущество метода переходных процессов – возможность пространственного совмещения источника и приемника. В гармоническом режиме это невозможно, и все известные на сегодня каротажные приемно-питающие установки имеют существенный разнос, что создает проблему точной привязки значения кажущегося сопротивления.

Радикальное уменьшение приемно-питающей установки позволяет, во-первых, резко повысить визуализирующие качества сигнала, что немаловажно при необходимости оперативной оценки каротажных исследований. Во-вторых, это позволяет уменьшить размеры (длину) каротажного прибора при сохранении глубинности.

Что касается технических проблем, связанных с малыми временами, то возможно не следует использовать классические формы метода ЗС такие, как ступенчатое выключение тока и подробная фиксация кривой становления. Вместо этого, может быть, следует рассмотреть более практичные формы питающего импульса и фиксировать некоторые интегральные характеристики процесса установления электромагнитного поля в среде.

В каротажных исследованиях ЗС, как возможный способ, рассматривались давно. Можно отметить такие ранние работы как [1]. В этих работах привлекались довольно простые модели. Мы попытаемся получить некоторые оценки с помощью более реалистичного моделирования с привлечением многослойных моделей среды и при размещении каротажной установки в наклонной скважине. При этом мы ограничиваемся индуктивными (незаземленными) приемно-питающими установками.

Математический аппарат

Математический аппарат каротажа методом переходных процессов включает в себя нестационарные одномерные прямые задачи для горизонтально-слоистых и цилиндрически-слоистых сред, а также, двухмерные и трехмерные прямые задачи. Особый вопрос состоит в учете токов смещения. Разумеется, этот аппарат тесно связан с аппаратом наземного метода переходных процессов. Мы и не будем здесь вновь его описывать в полном объеме, а ограничимся некоторыми

специфическими моментами. Например, рассмотрим решение для горизонтального магнитного диполя, погруженного в горизонтально-слоистый разрез.

Приводим здесь только постановку задачи. В общем случае рассмотрим источник, как некоторый гармонический магнитный ток [2] в плоскости $z = z_0$, характеризующийся поверхностной плотностью $\vec{j}^M(x, y) \cdot \exp(-i\omega t)$ (в Амперах). Решаем задачу в квазистационарном приближении в однородной по магнитной проницаемости (всюду $\mu = \mu_0$) среде. Однако здесь мы учтем анизотропию пластов. Таким образом, слоистая среда описывается набором параметров: σ_{i0} , σ_{n0} (верхнее полупространство), σ_{ii} , σ_{ni} ($i=1, 2, \dots, N-1$), σ_{iN} , σ_{nN} (нижнее полупространство). Координаты границ - z_i , $i=1, 2, \dots, N$, ось z направлена вниз, $z_1 = 0$.

В каждом однородном слое ($i=0, 1, \dots, N$) и исключая плоскость $z = z_0$ мы должны решить систему уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \hat{\sigma}_i \vec{E}, \\ \text{rot} \vec{E} &= i\omega \mu_0 \vec{H}, \\ \text{div} \vec{j} &= 0, \\ \text{div} \vec{H} &= 0, \end{aligned} \quad \hat{\sigma}_i = \begin{pmatrix} \sigma_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ni} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где теперь

и $\vec{j} = \hat{\sigma}_i \vec{E}$. На границах между слоями непрерывны горизонтальные компоненты поля (H_x, H_y, E_x, E_y). На границе $z = z_0$, которая содержит поверхностный сторонний магнитный ток, должны выполняться особые условия:

$$\begin{aligned} [E_x]_{z=z_0} &= i\omega \mu_0 \cdot j_y^M(x, y), & [H_x]_{z=z_0} &= 0, \\ [E_y]_{z=z_0} &= -i\omega \mu_0 \cdot j_x^M(x, y), & [H_y]_{z=z_0} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее $[F]_{z=z_i}$ обозначает скачок функции F при переходе границы $z = z_i$. Итак, мы рассматриваем однородную систему уравнений, а источник учитываем как дополнительное граничное условие в общей задаче для полного поля. Задачу решаем разделением переменных, отделяя сначала латеральные переменные и переходя к одномерной задаче:

$$f(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} f^*(\xi, \eta, z, t) e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta, \quad (3)$$

Двойное преобразование Фурье удобно рассматривать, но практически оно эквивалентно одномерному преобразованию Ханкеля. В области пространственных гармоник получим две задачи «магнитного» и «электрического» типа для образов вертикальных магнитной и электрической компонент. Далее продолжаем разделять переменные, отделяя время в виде $\exp(-at)$. Если принять непрерывный спектр $\alpha = i\omega$ ($-\infty \leq \omega \leq \infty$), то получим решение «в частотной области». Обычный подход для построения алгоритма прямых задач во временной области состоит в интегральной Фурье-трансформации решения в частотной области. Такие решения для режима становления мы использовали для горизонтальных и цилиндрических моделей сред. Однако в целях независимой оценки и тестирования мы применили также вообще редко используемое решение непосредственно во временной области методом, предложенным когда-то А.Н.Тихоновым [3]. Суть его состоит в том, что теперь мы пытаемся найти дискретный спектр α_j ($j=0, 1, 2, \dots$), и это удается сделать для сред с изолирующими, либо с идеально проводящими верхним и нижним полупространствами. Решение, соответственно, представится рядом Фурье.

Приведем здесь наше сравнение расчетов по этим двум алгоритмам (Таблица 1). Модель среды – пласт, $\rho=1$ Ом·м, мощность 50м, верхнее и нижнее полупространства – изолирующие. Двухкатушечный зонд с вертикальными катушками погружен (генератор на 27м, приемник на 32м) в пласт. Расхождения на первом времени и на последних связано с тем, что тихоновский алгоритм лучше работает на поздних времена и хуже на ранних, а «решение в частотной области» – наоборот.

Время, мс	Решение «в частотной области», В/А/м ⁴	Решение по Тихонову, В/А/м ⁴	Расхождение, %
5.0E-04	-3.561489E-08	-3.380446E-08	5.21
1.0E-03	-1.542713E-05	-1.542635E-05	5.04E-03
3.0E-03	-1.859629E-04	-1.859629E-04	0.00
7.2E-03	-9.597027E-05	-9.597023E-05	3.79E-05
2.3E-02	-1.113239E-05	-1.113232E-05	6.29E-04
5.0E-02	-1.921197E-06	-1.921147E-06	2.60E-03
8.0E-02	-6.296238E-07	-6.295643E-07	9.45E-03
1.7E-01	-1.017293E-07	-1.016618E-07	6.63E-02
3.5E-01	-1.734277E-08	-1.728073E-08	0.35
5.0E-01	-7.085573E-09	-7.022763E-09	0.89

Сравнение каротажных кривых в частотной и временной областях

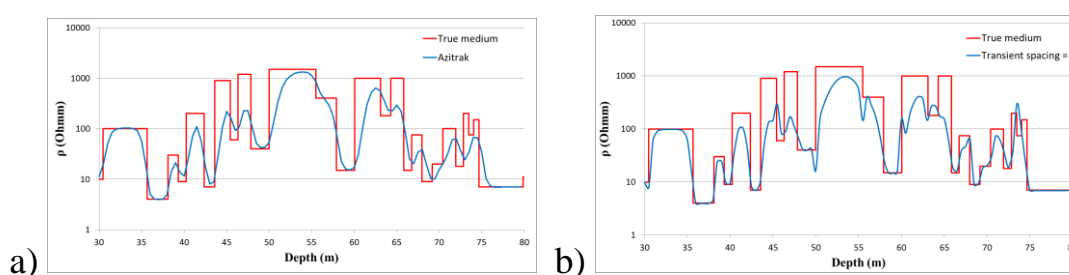


Рис.1. Кажущееся сопротивление в сравнении с истинным. а – частотный 3-катушечный зонд Azittrak компании Baker Hughes, разность фаз, компонента ZZ, 2 МГц; б – становление с 2-катушечного совмещенного зонда, ЭДС, компонента ZZ, 1.E-8 сек

Графики а и б показывают как профильные кривые (кажущееся сопротивление) с частотного зонда (Azittrak) и от совмещенного в режиме становления отражают истинное распределение сопротивлений. Становление на совмещенном зонде (график б) выглядит лучше в области тонкой слоистости и более детально восстанавливает модель. Также неоспоримое преимущество совмещенного зонда – его размер и естественная привязка положения зонда к модели. Техническая сложность совмещенного зонда состоит в том, что необходимо регистрировать сверхдлинные времена, что достаточно проблематично.

1. Кауфман А.А., Соколов В.П. Теория индукционного каротажа методом переходных процессов. Изд. «Наука», Сибирское отделение. Новосибирск, 1972. 128 с.
2. Дмитриев В.И. Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде // Вычислительные методы и программирование. - 1968.- Вып. 10. - С. 55-65.
3. Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной среде. II // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т. 14, N 4. С. 281 - 293.