

Н. Л. Миронцов

## Один возможный способ повышения точности решения обратной задачи электрометрии скважин

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

*Рассмотрен классический подход решения обратной задачи электрометрии скважин, основанный на минимизации функционала, нормированного на величину погрешности измерения. Показано, что минимизацию необходимо осуществлять, нормируя функционал на величину погрешности не измерения, а на величину погрешности инверсии, соответствующей этому измерению. Описан алгоритм такого решения. Доказана целесообразность использования заранее рассчитанной таблицы, связывающей геоэлектрические параметры модели с данными измерения.*

Развитие каротажа объясняется в том числе тем, что намного более точный метод документации разреза — отбор керна является намного более сложным, затратным и долгим. Во всем множестве методов геофизического исследования скважин (ГИС) электрометрия занимает особое место, так как позволяет ответить на два основных вопроса, интересующих заказчика геофизических услуг: где находятся углеводороды и какое их относительное содержание? Условно высокое сопротивление пористой породы может служить признаком содержания нефти или газа в ее порах. Низкое сопротивление соответственно может показывать содержание воды.

По данным каротажа, восстановление геоэлектрических параметров разреза геофизиками принято называть решением обратной задачи. Возможность точного решения такой обратной задачи должно быть основополагающим при разработке и эксплуатации любых аппаратурно-методических комплексов электрического и индукционного каротажа (соответственно ЭК и ИК). Это следует из основного требования, которое выставляет заказчик геофизических услуг.

Действительно, ответ на основные вопросы, где находится полезный флюид, сколько его и с какой суточной скоростью его можно добывать, скрыт не в измеряемых кажущихся величинах (кажущаяся проводимость (КП) или кажущееся сопротивление (КС)), а в точной геоэлектрической модели разреза, описываемой пространственным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС) или удельной электрической проводимости (УЭП). Из этого напрямую следует, что создание аппаратуры с превосходными характеристиками измерения КС или КП, для которой не может быть точно решена обратная задача, менее предпочтительно, чем создание аппаратуры с худшими характеристиками измерения, но для которой возможно более точное решение обратной задачи (т. е. более точно определены искомые параметры модели разреза). Смысл любой интерпретации состоит в подборе параметров разреза таким образом, чтобы показания зондов в ней были наиболее близки к реально полученным.

Каротаж с точки зрения количественной интерпретации является процессом косвенного измерения, так как искомые величины рассчитываются по измеренным. Только каротаж

некоторыми типами аппаратуры и в некоторых условиях можно считать прямым измерением: БК (боковой каротаж) трехэлектродным зондом БК-3 [1, 2] — прямое измерение УЭС непроницаемого пласта без влияния скважины; ИК зондом 6Ф1 (или 6FF40) — прямое измерение УЭП пласта [3]. Для получения значений всех требуемых геоэлектрических параметров разреза необходимо использовать комплекс нескольких зондов.

Погрешность определения искомым геоэлектрических параметров разреза определяется особенностями метода инверсии (решения обратной задачи) и погрешностью данных каротажа (погрешность начальных данных для обратной задачи).

Однако в некоторых случаях [4, 5] при минимизации функционала

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T + \chi_i} \right)^2} \quad (1)$$

(здесь  $\delta_i$  — относительная погрешность  $i$ -го зонда;  $\chi_i$  — абсолютная погрешность  $i$ -го зонда) не учитывается величина погрешности определения искомого параметра. Функционал (1) обобщает другие применяемые на практике при минимизации функционалы [6–9].

Рассмотрим один возможный эмпирический метод решения обратной задачи, а именно вместо (1) будем минимизировать

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\lambda_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  — величины погрешности инверсии при заданных величинах погрешности измерения  $\delta_i^P$ ,  $i = \overline{1, n}$  и  $\chi_i^P$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Вопрос выбора  $\lambda_i$  требует формализации выбора нормы в пространстве  $G$ . Естественно, что такой выбор объективно не может быть сделан однозначно без учета специфики решаемой задачи оперативной интерпретации (в некоторых случаях для последующей комплексной интерпретации точность определения некоторых параметров носит более высокий приоритет, чем точность определения других). Однако эмпирическим путем для задач определения параметров модели с равновеликой относительной погрешностью был выбран следующий способ задания величин  $\lambda_i$ :  $\lambda_i$  — объем минимального  $m$ -мерного параллелепипеда в  $m$ -мерном пространстве ( $m$  — количество параметров модели), в который может полностью поместиться область  $\vec{g} + \delta\vec{g}$ , соответствующая всем возможным значениям  $\delta_i \rho_i^T + \chi_i$ .

Формально алгоритм может быть реализован следующим образом. На первом этапе мы рассчитываем таблицу (аналогичную таблице [10]) значений данных каротажа для различных значений параметров модели (в билогарифмическом или любом другом масштабе, обеспечивающем наивысшую точность). На следующем этапе, мы не будем искать минимальное значение (1). Напротив, выберем из этой таблицы отдельно для каждого зонда те значения  $\vec{p}$  параметров модели, которые соответствуют показаниям этого зонда  $\delta_i \rho_i^P - \chi_i \leq \rho_i^T \leq \delta_i \rho_i^P + \chi_i$ . После чего найдем пересечение областей допустимых параметров, полученных для каждого зонда. Заметим, что использование заранее рассчитанной таблицы зависимости данных каротажа от трех параметров, каждый из которых имеет 1000 возможных значений, потребует  $10^9$  решений прямой задачи и хранения результатов такого решения в  $8 \cdot 10^{10}$  Бт информации (для семизондовой аппаратуры, учитывая что каждое значение хранится в переменной типа double (8 Бт)). При построении четырехслойной модели (пять параметров), мы получим  $2,4 \cdot 10^{16}$  Бт информации (при  $10^{15}$  решениях

прямой задачи). Конечно, для 1000 значений одного параметра — это более чем достаточно, но и масштаб расчета становится понятен: при времени решения прямой задачи 3 сек общее время построения такой таблицы займет 97 лет (это только для трехслойной модели).

Кроме того, заметим, что предлагаемый билогарифмический масштаб [10] не является наиболее рациональным с точки зрения решаемой задачи. Действительно, при построении такой таблицы важным для нас является постоянная величина относительной погрешности.

Другими словами, искомый параметр должен изменяться таким образом, чтобы разница между соседними значениями соответствовала постоянной величине относительной погрешности. Такую последовательность легко построить с помощью геометрической прогрессии:  $x_n = x_1(1 + \Delta)^n$  (где  $\Delta$  — величина относительной погрешности;  $x_1$  — наименьшее значение диапазона).

Для построения диапазона с наименьшим значением 0,01 Ом · м и  $\Delta = 0,01$  (1%) нам понадобится 695 значений (диапазон 0,01 — 10 Ом · м); 925 значений (диапазон 0,01 — 100 Ом · м); 1157 значений (диапазон 0,01 — 1000 Ом · м). Другими словами, даже 1000 значений параметра при точности 1% в диапазоне 0,01–1000 Ом · м (рабочий диапазон малых зондов бокового каротажного зондирования (БКЗ) недостаточно).

Заметим, что предлагаемый алгоритм вообще может не содержать такой таблицы или содержать ее для 5–10 значений изменения каждого параметра модели. Используемые быстрые методы решения прямой задачи [11, 12] можно в режиме реального времени достраивать такую таблицу в нужных местах (метод уточнения значений изменения параметров модели по методу наискорейшего спуска — решение обратной задачи в режиме реального времени).

Если области допустимых значений искомых параметров не имеют пересечения, то возможны два варианта:

1. Один или несколько зондов имеет фактическую погрешность измерения больше установленной в калибровке или заявленной в паспорте (а возможно, просто вышли из строя). В этом случае необходимо провести переинтерпретацию, последовательно исключая один или несколько зондов из комплекса с последующей обязательной лабораторной проверкой работоспособности комплекса.

2. Выбранная модель инверсии неадекватно описывает данный пласт (или не полностью учтено влияние вмещающих при использовании 1D модели пласта). В этом случае необходимо изменить тип модели и также произвести переинтерпретацию.

Заметим, что при тестировании алгоритма такого решения обратной задачи возникали обе такие ситуации. В первом случае выявившаяся при интерпретации неисправность зонда была подтверждена его последующей проверкой. А на ряде интервалов, где алгоритм проверки качества БКЗ (по сопоставлению показаний на плотных пластах) показывал низкое качество, приведенный алгоритм с учетом допустимой погрешности показывал удовлетворительное качество записи, что также подтверждалось в последствии повторным каротажем другим комплектом аппаратуры. Что касается второго варианта, то он в основном возникал на сравнительно новых интервалах, где пласты-коллекторы следует описывать четырехслойной моделью.

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что решение обратной задачи, основанное на минимизации (1), может дать неверный и необоснованный результат. В то же время минимизация (2) ведет к уменьшению погрешности решения такой задачи.

1. *Ильинский В. М.* Боковой каротаж. – Москва: Недра, 1971. – 144 с.
2. *Guyod H.* Factors affecting the responses of Laterlog-type logging system (LL3 and LL7) // *J. Petrol. Technol.* – 1964. – **16**, No 2. – P. 211–219.
3. *Anderson B. I. Barber T. D.* Induction logging. – Houston: Schlumberger, 1997. – 45 p.
4. *Phasor Induction tool.* – Houston: Schlumberger, 1989. – Doc. SMP-9060.
5. *Кнеллер Л. Е., Потапов А. П.* Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // *Геология и геофизика.* – 2010. – № 1. – С. 52–64.
6. *Кнеллер Л. Е., Потапов А. П.* Решение прямой и обратной задач электрокаротажа в радиально-неоднородных средах // Там же. – 1989. – № 1. – С. 83–96.
7. *Кнеллер Л. Е., Потапов А. П.* Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа с учетом вертикальной и радиальной неоднородности геоэлектрического разреза // *Изв. вузов. Сер. Геология и разведка.* – 1990. – № 9. – С. 95–102.
8. *Потапов А. П., Кнеллер Л. Е.* Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа для сред с произвольным и дискретным распределением проводимости по глубине // Там же. – 1990. – № 9. – С. 122–130.
9. *Глинский В. Н., Эпов М. И.* Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа // *НТВ Каротажник.* – 2006. – № 6(147). – С. 59–68.
10. *Красножон М., Косаченко В., Ручко В.* Технологія “Геопошук” для вивчення нафтогазових родовищ // *Геолог України.* – 2009. – № 1./2. – С. 32–40.
11. *Миронцов М. Л.* Метод розв’язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу // *Доп. НАН України.* – 2007. – № 2. – С. 128–132.
12. *Миронцов М. Л.* Метод розв’язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу // *Геофиз. журн.* – 2007. – **29**, № 5. – С. 212–214.

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

*Поступило в редакцию 21.08.2012*

**М. Л. Миронцов**

### **Один можливий спосіб підвищення точності розв’язання оберненої задачі електрометрії свердловин**

*Розглянуто класичний підхід розв’язання оберненої задачі електрометрії свердловин, обґрунтований на мінімізації функціонала, нормованого на величину похибки вимірювання. Показано, що мінімізацію необхідно здійснювати, нормуючи функціонал на величину похибки не вимірювання, а на величину похибки інверсії, що відповідає цьому вимірюванню. Описано алгоритм такого розв’язання. Доведено недоцільність використання заздалегідь розрахованої таблиці, що пов’язує геоелектричні параметри моделі з даними вимірювання.*

**M. L. Myrontsov**

### **One possible method of accuracy increase for the solution of an inverse problem in borehole electrical measurements**

*The classical approach to the solution of an inverse problem in borehole electrical measurements, which is based on minimizing the functional normalized by the measurement error, is considered. It is shown that the minimization should be performed by normalizing the functional by the value of measurement error rather than the value of error of the inversion corresponding to this measurement. The algorithm of this solution is described. The inexpediency of the use of a previously calculated table connecting model’s geoelectrical parameters with measured data is demonstrated.*