

УДК 681.2.083

**БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНДУКТОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПРОВОДИМОСТИ СКВАЖИННОЙ ЖИДКОСТИ**

**NON-CONTACT CONDUCTOMETER FOR THE WELL FLUID
CONDUCTIVITY CONTROL**

Латышев Л.Н., Иванов В.В.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Россия

L.N. Latyshev, V.V. Ivanov

FSBEI NPE Ufa state petroleum technological university, Russia
e-mail: valera_an2@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности использования кондуктометров в процессе бурения и исследования скважин и показано преимущество бесконтактного кондуктометра с жидкостным контуром связи. Выявлены недостатки таких приборов, связанные с воздействием влияющих факторов, таких как стабильность источника гармонических колебаний, стабильность частоты сигнала, температура окружающей среды, влияющих на погрешность измерения. Предложена схема бесконтактного кондуктометра с компенсационной обмоткой связанной с магазином проводимостей. Проведены исследования работы такого прибора. В результате, выявлено, что воздействие влияющих факторов в таком кондуктометре отсутствует. Разработана экспериментальная модель прибора, для проверки теоретических выводов. Представлена схема такой модели. Проведены эксперименты, доказывающие работоспособность предложенной модели. Отклонение влияющих факторов от номинальных значений на $\pm 10\%$ не повлияло на результат измерения, что соответствует теоретическим выкладкам. Также рассмотрены два типа компенсации магнитных потоков в рассматриваемой модели кондуктометра: метод компенсации по фазе и по амплитуде. Выявлено, что метод компенсации по фазе позволяет добиться более точных результатов измерений, благодаря невысоким требованиям к чувствительности средств измерений при определении фазового сдвига. Рекомендовано разрабатывать кондуктометр на основе предложенной модели.

Abstract. This article deals with features of conductometers used in drilling and well testing. It shows the advantages of a non-contact conductivometer with liquid-loop connection. This work identifies weaknesses of such devices associated with the impact of influencing factors such as harmonic oscillations source stability, signal frequency stability, ambient temperature, which all affect the accuracy of measurements. The

article proposes a scheme of a non-contact conductometer with compensating coil connected to a conductance box. The operation of such a device has been carried out. As a result, no effect of influencing factors in such a conductometer was found. An experimental model of the device was designed for verification of theoretical conclusions. The scheme of such a model has been shown. Experiments demonstrating the efficiency of the proposed model have been carried out. The deviation of the influencing factors from the nominal values at $\pm 10\%$ did not affect the result of the measurement, which corresponds to the theoretical calculations. This article also considers two types of magnetic fluxes compensation in the analyzed model of a conductometer: phase and amplitude compensation methods. It was revealed that the phase compensation method allows for more accurate results, due to the low sensitivity requirements for measurers when determining a phase shift. The authors of this article encourage developing conductometer based on the proposed model.

Ключевые слова: исследование скважин, измерение, жидкость, электропроводность, кондуктометрия, бесконтактный метод, жидкостной виток, индукционный ток, компенсационная обмотка.

Keywords: well test, measurement, fluid, electrical conductivity, conductometers, non-contact method, liquid coil, induction current, compensating coil.

Кондуктометрия – это метод измерения электрической проводимости жидкостей. Он применяется на многих этапах добычи нефти: бурение и ремонт скважин, подготовка нефти, переработка и др. Например, при бурении скважин, по изменению электрической проводимости промывочной жидкости можно судить о притоках пластовых вод в скважину, а на этапе подготовки нефти кондуктометрия позволяет определить ее влажность. Использование кондуктометра в нефтегазовой промышленности возможно при соблюдении следующих требований [1,2]:

- 1) прибор должен обеспечивать измерение проводимости вязких, высококонцентрированных и содержащих взвеси жидкостей;
- 2) широкий диапазон рабочих температур;
- 3) широкий диапазон измерений;
- 4) возможность работы прибора при высоком давлении.

В полном объеме этим требованиям соответствуют бесконтактные кондуктометры с жидкостным контуром связи [3]. Его погрешности рассмотрены в [4], также выявлено, что на результат измерения влияет стабильность напряжения источника возбуждения, постоянство частоты сигнала, а также изменение магнитной проницаемости ферритового сердечника трансформатора, которая зависит от температуры. Целью настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование источников погрешности измерения и их устранение.

С этой целью была разработана схема кондуктометра с многосекционными компенсационными обмотками, представленная на рисунке 1[5].

Устройство работает следующим образом. Напряжения от генератора 1 поступает на обмотку возбуждения 2 питающего трансформатора 3. При этом в жидкостном витке 4 и компенсационной обмотке наводятся ЭДС. ЭДС, действующая в жидкостном витке 4, вызывает ток, значение которого зависит от электропроводности жидкости и который создает в магнитопроводе измерительного трансформатора 5 магнитный поток.

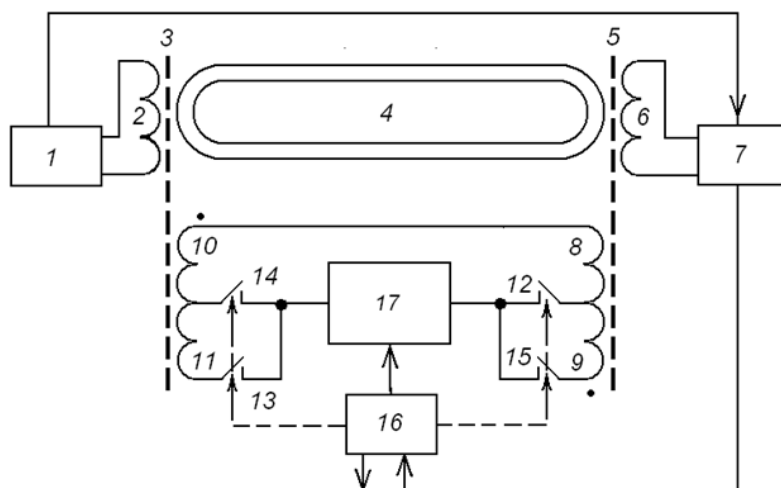


Рисунок 1. Бесконтактный кондуктометр с ЖКС с дополнительными компенсационными обмотками

1 - генератор синусоидальных сигналов, 2 - обмотка возбуждения, 3 - питающий трансформатор, 4 - замкнутый виток из электропроводящей исследуемой жидкости, 5 - измерительный трансформатор, 6 - измерительная обмотка, 7 - фазочувствительный нуль-орган, 8,9,10,11 - секций компенсационных обмоток, 12,13,14,15 - ключи, 16 - схема управления, 17 - магазин проводимостей.

ЭДС, действующая в компенсационной обмотке, вызывает ток, значение которого зависит от установленного значения в магазине проводимостей. Магнитные потоки, создаваемые токами в жидкостном витке и компенсационной обмотке, имеют противоположное направление. Таким образом, напряжение индуцируемое в измерительной обмотке 6 будет пропорционально разности магнитных потоков, а, следовательно, и токов. По сигналу, полученному с фазочувствительного нуль-органа 7, схема управления изменяет значение магазина проводимостей и положение ключей до тех пор, пока напряжение на измерительной обмотке не будет равно нулю. Код, вырабатываемый схемой управления, который подается на магазин и на ключи, является выходным сигналом, который определяет проводимость жидкостного витка. Проведем анализ работы преобразователя по схеме (рисунок 2).

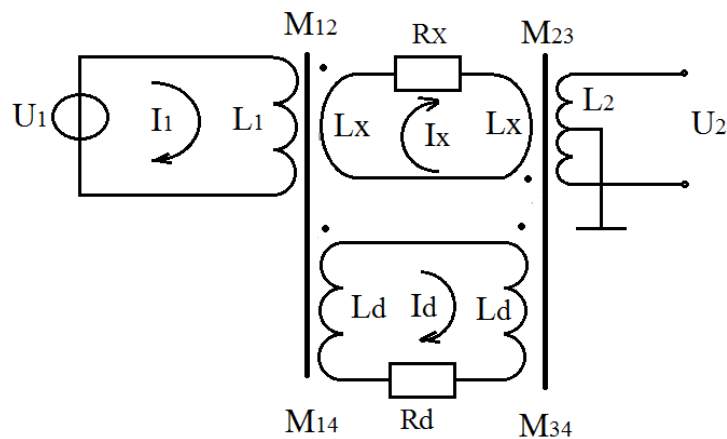


Рисунок 2. Схема измерительного преобразователя

Система уравнений, описывающих работу схемы:

$$\begin{cases} j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_x + j\omega M_{14} I_d = U_1 \\ 2j\omega L_x I_x + j\omega M_{12} I_1 + R_x I_x = 0 \\ 2j\omega L_d I_d + j\omega M_{14} I_1 + R_d I_d = 0 \\ j\omega M_{23} I_x - j\omega M_{34} I_d = U_2 \end{cases}, \quad (1-4)$$

где U_1 – напряжение источника питания;

U_2 – напряжение в измерительной обмотке измерительного трансформатора;

I_1 – ток в возбуждающей обмотке питающего трансформатора;

I_x – ток в жидкостном витке;

I_d – ток в компенсирующей обмотке;

L_1 – индуктивность возбуждающей катушки;

L_x – индуктивность жидкостного витка;

L_d – индуктивность компенсирующей обмотки;

M_{12} – взаимная индуктивность возбуждающей обмотки и жидкостного витка;

M_{23} – взаимная индуктивность измерительной обмотки и жидкостного витка;

M_{14} – взаимная индуктивность возбуждающей и компенсирующей обмоток;

M_{34} – взаимная индуктивность измерительной и компенсирующей обмоток;

R_x – сопротивление жидкостного витка;

R_d – сопротивление компенсирующей обмотки;

ω – частота гармонических синусоидальных колебаний.

Выразим токи I_d и I_x из уравнений (2) и (3):

$$I_d = -\frac{j\omega M_{14} I_1}{R_d + 2j\omega L_d}, \quad (5)$$

$$I_x = -\frac{j\omega M_{12} I_1}{R_x + 2j\omega L_x}, \quad (6)$$

в момент, когда напряжение на выходе $U_2 = 0$, из уравнения (4) получаем:

$$j\omega M_{34}I_d = j\omega M_{23}I_x, \quad (7)$$

отсюда

$$I_x = \frac{M_{34}}{M_{23}} I_d. \quad (8)$$

Из уравнений (5),(6),(8) получаем зависимость между сопротивлениями при напряжении на измерительной обмотке $U_2 = 0$:

$$\frac{j\omega M_{12}I_1}{R_x + 2j\omega L_x} = \frac{M_{34}}{M_{23}} \frac{j\omega M_{14}I_1}{R_d + 2j\omega L_d}, \quad (9)$$

$$\frac{M_{12}}{R_x + 2j\omega L_x} = \frac{M_{34}}{M_{23}} \frac{M_{14}}{(R_d + 2j\omega L_d)}. \quad (10)$$

Заменяя G_x на $\frac{1}{R_x}$ и G_d на $\frac{1}{R_d}$, где G_x , G_d – проводимость жидкостного витка и проводимость из магазина проводимостей, получим:

$$G_x \frac{1}{1 + \frac{2j\omega L_x}{R_x}} = \frac{M_{34}M_{14}}{M_{23}M_{12}} G_d \frac{1}{1 + \frac{2j\omega L_d}{R_d}}. \quad (11)$$

Учитывая, что $\frac{2j\omega L_x}{R_x} \ll 1$ и $\frac{2j\omega L_d}{R_d} \ll 1$, можно вывести зависимость между G_x и G_d :

$$G_x = \frac{M_{34}M_{14}}{M_{23}M_{12}} G_d, \quad (12)$$

в уравнении (12) $M_{23}, M_{12} = M$, так как возбуждающая и измерительная обмотки трансформаторов имеют одинаковое количество витков, а жидкостной виток является общим для питающего и измерительного трансформаторов. Взаимная индуктивность между обмоткой трансформатора (возбуждающей или измерительной) и витком компенсационной обмотки равна взаимной индуктивности между обмоткой трансформатора и жидкостным витком, так как индуктивность жидкостного витка и витка компенсационной обмотки равны, а индуктивности измерительной и возбуждающей обмоток содержат постоянное число витков. Отсюда следует:

$$M_{34} = N_1 M, \quad (13)$$

$$M_{14} = N_2 M, \quad (14)$$

где N_1 и N_2 число витков в дополнительных обмотках, подключенных через ключи к магазину проводимостей. Получаем уравнение:

$$G_x = \frac{N_1 N_2 M^2}{M^2} G_d, \quad (15)$$

из него следует:

$$G_x = N_1 N_2 G_d \quad (16)$$

Уравнение (16) объясняет главное преимущество данного устройства – отсутствие таких факторов, влияющих на погрешность прибора, как амплитуда, частота, форма генерируемого напряжения и температура трансформаторов.

Исходя из уравнения (16), можно однозначно определить проводимость жидкостного витка:

$$\sigma_x = \frac{G_x}{k}, \quad (17)$$

где σ_x – удельная электрическая проводимость, k – постоянная электролитической ячейки.

Как видно из формулы (16), добиться нулевого напряжения на обмотке можно не только изменением проводимости магазина, но и изменением числа витков дополнительных компенсационных обмоток. Таким образом, введение многосекционных компенсационных обмоток позволяет расширить пределы измерений электропроводности жидкости.

Фазочувствительный нуль-орган определяет направление изменения проводимости, что позволяет улучшить динамические свойства устройства, это очень важно для измерения проводимости в потоке жидкости, где проводимость может меняться в значительных пределах и с большой скоростью. Схема управления вырабатывает сигналы для управления магазином проводимостей и ключами, которые соединяют секции компенсационных обмоток с магазином проводимостей. На выходе схемы управления формируется код, соответствующий значению проводимостей магазина и положению ключей. Схема управления позволяет автоматизировать процесс измерения, что улучшает динамические свойства и расширяет пределы измерений. Магазин проводимостей позволяет менять свою проводимость в достаточно широких пределах и является рабочим эталоном. Его качества в значительной мере определяют метрологические свойства устройства. Ключи, управляемые схемой управления, подключают магазин проводимостей к секциям компенсационных обмоток. Их наличие позволяет повысить пределы измерений. Многосекционные обмотки позволяют расширить пределы измерений электропроводности жидких сред.

Для проверки теории был разработан и реализован макет бесконтактного кондуктометра (рисунок 3).

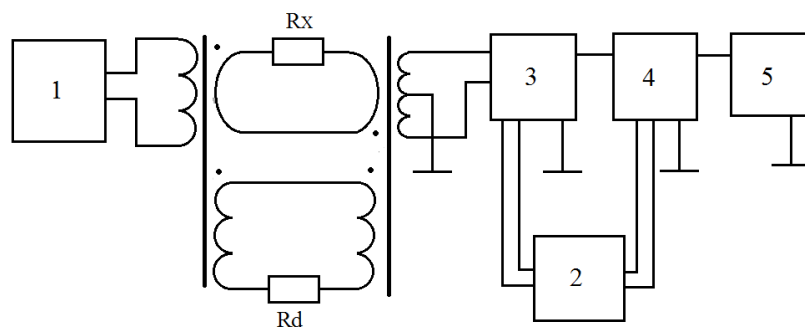


Рисунок 3. Схема макета бесконтактного кондуктометра с компенсационной обмоткой

1 – генератор гармонических колебаний, 2 – источник питания, 3 – инструментальный усилитель, 4 – избирательный усилитель с 2-Т мостом, 5 – вольтметр.

Для реализации схемы использовали:

1. Генератор гармонических колебаний Gwinstek GAG-810.
2. Источник питания MPS – 3002L-3 фирмы MATRIX.
3. Инструментальный усилитель AD 620 AN. Он необходим для усиления с высокой точностью передачи сигнала. Обладает широким диапазоном рабочих температур, а также высокой степенью подавления синфазных помех.
4. Избирательный усилитель с 2-Т мостом построен на основе операционного усилителя К140УД7. Он настроен на частоту 1 кГц и необходим для усиления полезного сигнала и ослабления помех низкой и высокой частоты.
5. Питающий трансформатор выполнен на основе ферромагнитного кольцевого сердечника М2000НМ3 с обмоткой 200 витков. Измерительный трансформатор выполнен на основе аналогичного сердечника с измерительной обмоткой имеющей среднюю точку. Такая конструкция трансформатора позволяет устранить помехи, которые возникают за счет внешних электромагнитных полей, пересекающих ферритовый магнитопровод.
6. Сопротивление жидкостного витка R_x имитирует магазин сопротивлений Р33 (ГОСТ 7003-64), подключенный к витку, охватывающего оба трансформатора. Второй магазин сопротивлений R_d класса 0,05 МСР-63 (ГОСТ 7003-64), предназначенный для компенсации, подключен к витку, который охватывает возбуждающий трансформатор согласно с первым витком, а измерительный трансформатор – встречно с первым витком. Таким образом, магнитные потоки, возникающие в измерительном трансформаторе, противоположны.

Суть эксперимента заключается в том, чтобы скомпенсировать магнитные потоки в измерительном трансформаторе, за счет подбора нужного сопротивления R_d . Существует 2 способа определения компенсации: по амплитуде и по фазе.

Компенсация по амплитуде. При подборе сопротивления компенсации во втором магазине необходимо добиться минимального значения выходного сигнала на вольтметре. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Метод компенсации по амплитуде

R _x , Ом	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
R _d , Ом	10,0	22,78	31,80	41,81	51,80	61,84	71,80	81,8	91,8	99,9	199,8	300	400	500
U, мВ	7,1	3,2	3	2,2	1,6	1,7	1,4	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,8	0,8

В диапазоне сопротивлений 10-70 Ом чувствительность схемы равна 0,1%, а в диапазоне 70-500 Ом – 1%. В данном случае под чувствительностью схемы понимается относительное изменение величины сопротивления в магазине, приводящее к видимому отклонению стрелки на вольтметре.

Компенсация по фазе. При полной компенсации, выходной сигнал должен быть в противофазе с сигналом источника гармонических колебаний. Для определения разности фаз использовали осциллограф Gwinstek GDS – 71022. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2. Метод компенсации по фазе

R _x , Ом	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
R _d , Ом	9,97	21,74	31,66	41,60	51,46	61,37	71,07	81,03	91,0	99,19	195,6	290	383	472
Δφ, °	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180

Как видно из опыта, компенсацией по фазе можно добиться более точных результатов, так как при компенсации по амплитуде большое влияние на результат измерений оказывает сам измерительный прибор, точнее его чувствительность. В нашем случае, когда сигнал после уравнивания приблизительно равен нулю, необходимы очень чувствительные измерительные приборы, а для метода компенсации по фазе можно использовать фазочувствительный нуль-орган. Поэтому метод компенсации по фазе в нашем случае является более предпочтительным.

Для оценки влияния изменения напряжения и частоты питающего генератора производилось отклонение от номинальных значений $\pm 10\%$. Увеличение напряжения не влияло на результат измерения, а уменьшение незначительно влияло на чувствительность. Изменение частоты на ± 100 Гц также не сказалось на результате измерения.

Исследование компенсационного преобразователя позволяет сделать выводы о перспективности разработки кондуктометра на его основе.

Выводы

В нефтегазовой промышленности необходимо использовать надежные поточные кондуктометры, позволяющие проводить анализ агрессивных, концентрированных, содержащих механические примеси жидкостей. Для таких целей рекомендуется низкочастотный бесконтактный кондуктометр с жидкостным контуром связи. Однако, на результат измерения такого прибора оказывают влияние следующие факторы:

- стабильность источника гармонических колебаний;
- стабильность частоты источника;
- температура окружающей среды.

Чтобы исключить влияние этих факторов, была разработана модель кондуктометра.

Экспериментально доказано, что бесконтактный кондуктометр с жидкостным контуром связи с компенсационной обмоткой, предложенный в данной статье, позволяет исключить воздействие основных влияющих факторов на результат измерения удельной электрической проводимости растворов.

Литература

1. Исследования парогидротермальных скважин геофизическими методами /Калташев С.А. и др. // Измерительные элементы и системы управления в нефтяной и газовой промышленности: сб. науч. тр./УГНТУ Уфа, 1988. С. 23-28.
2. Токарев М.А. Комплексный геолого-промысловый контроль за текущей нефтеотдачей при вытеснении нефти водой. М. Недра, 1990, 226 с.
3. Лопатин Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа. М.: Высшая школа, 1975. 296 с.
4. Иванов В.В., Латышев Л.Н. Анализ методов и средств измерения электропроводности жидких сред // Нефтегазовое дело: науч- техн. журн/УГНТУ. 2013. №2. С. 93.
5. Латышев Л.Н., Иванов В.В. Устройство для измерения электропроводности жидкости. Патент РФ №122777. 2012. //ТЕХДОКУМЕНТ.РУ: портал нормативно-техн. документации.

References

1. Research of vapour-hydro-thermal wells using geophysical methods / Kaltashev S.A. // Measuring elements and control systems in oil and gas industry: collection of scientific works/ Ufa State Petroleum Technological University Ufa, 1988. p. 23-28. [in Russian]
2. Tokarev M.A. An integrated geological and oilfield control of the current oil recovery when displacing oil with water. M. Nedra, 1990, 226 p.

3. Lopatin B.A. Theoretical basis of electrochemical methods of analysis. M.: Vysshaya Shkola, 1975. 296 p. [in Russian]
4. Ivanov V.V., Latvians L.N. Analysis of methods and means of measuring electrical conductivity of liquids // Neftegazovoe delo. 2013. №2. p. 93. [in Russian]
5. Latyshev L.N., Ivanov V.V. Liquid conductivity measuring device. RF Patent №122777. 2012. // TEHDOKUMENT.RU: the portal of normative-technical. documentation. [in Russian]

Сведения об авторах

Латышев Л.Н., канд. тех. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г.Уфа

L.N. Latyshev, cand. tech. sci., associate professor of chair «Automation of technological processes and productions», FSBEI HPE USPTU, Russia

Иванов В.В., студент гр. БАГ 09-01, ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа

V.V. Ivanov, student from gr. BAG 09-01, FSBEI HPE USPTU, Russia
e-mail: valera_an2@mail.ru