

Ю. И. Кудрявцев, А. К. Сараев

## **ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

### **Введение**

В приборах для измерения магнитной восприимчивости полезный сигнал формируется индукционным преобразователем (зондом) на основе следующего взаимодействия: генераторная катушка — исследуемая магнитная среда — приемная катушка (иногда функционирующая совместно с фокусирующей катушкой). Зависимость этого сигнала от геометрических условий измерений учитывается геометрическим фактором, расчетные значения которого используют при выборе оптимальной конструкции зонда и обосновании методики абсолютных определений магнитной восприимчивости. Наряду с основным типом взаимодействия зонда с исследуемой средой возникают также однокатушечные, индивидуальные взаимодействия каждой из катушек. Индуцируемая полем генераторной катушки намагниченность среды порождает вторичное магнитное поле, которое воздействует не только на приемную, но и на саму генераторную катушку, изменяя ее индуктивность и магнитный момент. Генераторная катушка намагничивает также ферромагнитный сердечник приемной катушки, который в качестве дополнительного источника поля подмагничивает среду. Это приводит к изменению индуктивности и ЭДС приемной катушки. Таким образом, в итоге однокатушечных взаимодействий могут появляться сигналы-помехи, ухудшающие геометрическую характеристику зонда и снижающие точность измерений. Разработка технических решений, способствующих существенному подавлению сигналов-помех при исследовании слабомагнитных сред, является важнейшим этапом при создании высокочувствительного зонда.

В статье рассматриваются вопросы проектирования высокочувствительного зонда для измерения магнитной восприимчивости с компенсацией однокатушечных эффектов.

### **Способы увеличения чувствительности зонда и подавления помех от однокатушечных взаимодействий с исследуемой средой**

При индукционных измерениях магнитной восприимчивости источником поля является генераторная катушка с токовой обмоткой, часто снабженная ферромагнитным (ферритовым) сердечником. Благодаря сердечнику уменьшается потребление мощности генераторной цепи и увеличивается полезный сигнал, который пропорционально зависит от магнитного момента генераторной катушки.

При проведении измерений в скважине или на плоской поверхности приходится считаться с влиянием исследуемой среды на индуктивность, активное сопротивление и магнитный момент генераторной катушки. Последнее обстоятельство осложняет обра-

ботку результатов измерений, так как расчетные зависимости геометрических факторов получены в предположении постоянства величины магнитного момента. Вопрос о его стабилизации при измерениях в магнитных средах был поставлен в работе [1]; результаты всесторонних теоретических и экспериментальных исследований зависимости магнитного момента от параметров среды и технические решения по его стабилизации отражены в последующих публикациях [2, 3].

Магнитный момент источника поля возрастает с увеличением размеров ферромагнитного сердечника (прежде всего его длины), которые, однако, ограничены приемлемыми габаритами проектируемого зонда. На практике обычно используют сердечник с ограниченным отношением его длины к диаметру, хотя и превосходящим во много раз единицу. Вследствие появления при этом существенного размагничивающего эффекта действующая проницаемость сердечника по сравнению с магнитной проницаемостью его материала снижается совместно с температурным коэффициентом в десятки раз, что обеспечивает температурную устойчивость величины магнитного момента. Для повышения точности расчетов характеристик индукционного зонда генераторную катушку с ферромагнитным сердечником следует представлять в виде двухполюсного источника, расстояние между полюсами которого находят умножением длины сердечника на экспериментально установленный коэффициент укорачивания [3, 4].

В настоящее время в аппаратуре для индукционных измерений магнитной восприимчивости и удельной электропроводности катушки приемных цепей зондов обычно не имеют ферромагнитных сердечников. Применение же в приемной катушке сердечника позволяет уменьшить в ней количество витков, увеличить чувствительность измерений и улучшить отношение сигнал—шум. Однако ферромагнитный сердечник, намагниченный полем генераторной катушки, приобретает магнитный момент, который взаимодействует с исследуемой средой. В результате появляется дополнительный сигнал, неучитываемый при теоретических расчетах и существенно зависящий от геометрических условий измерений [3, 5]. Разработка способа компенсации этого сигнала является предпосылкой для использования ферромагнитного сердечника в приемной катушке зонда, предназначенного для исследования слабомагнитных сред.

Известно два варианта такой компенсации. Можно исключить погрешность, вызванную магнитным моментом сердечника приемной катушки, скомпенсировав магнитный поток через витки этой катушки и размагнитив тем самым сердечник. При этом будет скомпенсирована и ЭДС приемной катушки. Как известно, этот способ компенсации реализуется в некоторых трансформаторных мостах; возможность применения его при индукционных измерениях обсуждалась в работе [6]. Полезный сигнал на выводах приемной катушки, появляющийся под воздействием среды с  $\epsilon \leq 0,2$  ед.СИ, весьма мал по сравнению с первичной ЭДС. Таким образом, как в воздухе, так и в присутствии среды напряжение приемной катушки сохраняется почти на нулевом уровне. Сердечник при этом остается почти размагниченным, что практически исключает влияние взаимодействия: приемная катушка — исследуемая среда — приемная катушка. Наиболее простой вариант зонда содержит одинаковые по всем параметрам катушки приемной цепи — приемную и фокусирующую (компенсационную), одинаково удаленные от генераторной катушки. Эти катушки включаются согласно в замкнутую цепь, взаимно размагничивая сердечники друг друга. При измерениях они разновысотно располагаются над плоской поверхностью среды, что исключает применение этого зонда в каротаже магнитной восприимчивости [6,7].

Повышение чувствительности измерений с предлагаемым зондом достигается не только применением ферромагнитных (ферритовых) сердечников в его катушках, но и использованием генераторной катушки в качестве времязадающего элемента последовательного резонансного контура генератора, выполненного по автоколебательной схеме. Благодаря резонансу напряжение на питающей обмотке генераторной катушки и ее магнитный момент возрастают в десятки раз. Это техническое решение обеспечивает оптимизацию схемы питания индуктивного источника поля от генератора, что позволяет отказаться от согласующего трансформатора. Особенностью этой схемы, однако, является уход частоты питающего напряжения под воздействием исследуемой среды и появление дополнительного сигнала-помехи, который также должен быть скомпенсирован. Схема с резонансной автоподстройкой частоты питания генераторной катушки рассмотрена в авторских свидетельствах [8, 9] и после модернизации использована в приборе для измерения магнитной восприимчивости образцов ИМВО [10].

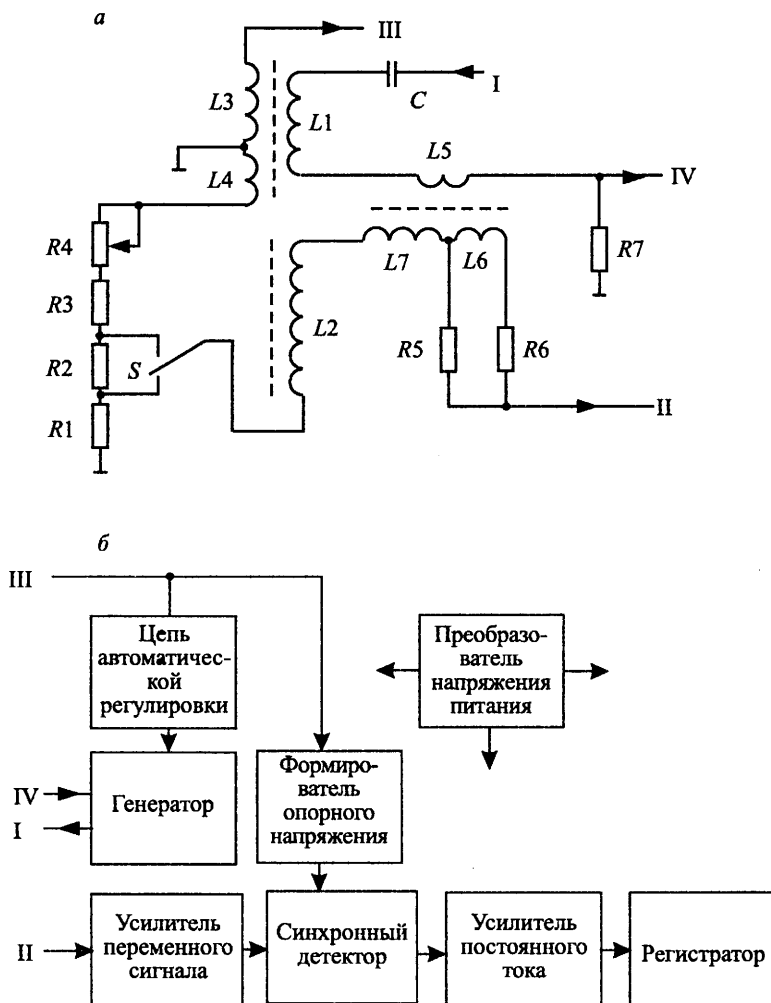
В зонде реализован предложенный в авторском свидетельстве [11] способ компенсации однокатушечных эффектов путем применения трансформатора, связывающего приемную и генераторные цепи. В присутствии магнитной среды ток в генераторной цепи и напряжение на вторичной обмотке трансформатора уменьшаются из-за возрастания индуктивности генераторной катушки, но напряжение на выводах приемной катушки при этом увеличивается. Сигналы-помехи индивидуальных взаимодействий катушек со средой при определенных условиях взаимно гасят друг друга в приемной цепи зонда. В дальнейшем такого рода зонд теоретически и экспериментально исследован в работе [12].

В высокочувствительном зонде с взаимокompенсацией однокатушечных эффектов используется генераторная катушка в качестве индуктивного элемента резонансного контура и трансформатор, связывающий генераторную и приемную цепи.

## Электрическая схема зонда

На рисунке представлены электрическая схема зонда (*а*) и типовая структурная схема других узлов прибора для измерения магнитной восприимчивости (*б*). Особенностью этого индукционного преобразователя является обеспечение автоколебательного режима его работы и наличие цепи компенсации однокатушечных эффектов. Первичная намагничивающая обмотка  $L1$  совместно с конденсатором  $C$  и резистором положительной обратной связи  $R7$  образуют последовательную резонансную цепь, подключенную проводом  $I$  к выходу генератора. При резонансе индуктивное напряжение на  $L1$ , компенсирующееся в цепи напряжением на конденсаторе  $C$ , оказывается в  $Q$  раз ( $Q$  — добротность генераторной катушки) больше напряжения  $U_n$  генератора. В итоге существенно возрастают напряжение на обмотке  $L1$ , магнитный момент генераторной катушки и чувствительность измерений. На резонансной частоте сопротивление колебательного контура носит активный характер и на резисторе  $R7$  с сопротивлением, существенно меньшим активного сопротивления обмотки  $L1$ , падает напряжение, совпадающее по фазе с выходным напряжением генератора. Ввиду соблюдения баланса фаз при подключении резистора  $R7$  проводом  $IV$  ко входу генератора возникает автоколебательный режим.

В электрической схеме зонда для компенсации однокатушечных эффектов используется трансформатор тока. Первичная обмотка трансформатора  $L5$  включена после-



Электрическая схема зонда (*a*) и типовая структурная схема прибора для измерения магнитной восприимчивости (*б*)

довательно с намагничивающей обмоткой  $L1$  генераторной катушки, резонансным конденсатором  $C$  и резистором  $R7$  положительной обратной связи. Индуктивность обмотки  $L5$  существенно ниже индуктивности  $L1$  и почти не влияет на резонансную частоту. Генератор питания функционирует в автоколебательном режиме. Вторичная обмотка трансформатора  $L7$ , к части которой —  $L6$  — подключен резисторный делитель напряжения с резисторами  $R5$  и  $R6$ , соединена последовательно и согласно с приемной катушкой  $L2$  с ферромагнитным сердечником в приемную цепь зонда. Последняя одним выводом через переключатель  $S$  подключена для компенсации напряжения приемной цепи в воздухе к выходу резисторного делителя напряжения  $R1 - R4$ , а проводом  $\Pi$  соединена с усилительно-регистрирующей схемой.

### Условия взаимной компенсации индивидуальных взаимодействий катушек зонда со слабомагнитной средой

В отсутствии исследуемой среды сумма первичной ЭДС приемной катушки  $\mathcal{E}_0$  и напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $\mathcal{U}_{\text{тp0}}$  компенсируется падением напряжения на резисторе  $R1$  и напряжение на выходе приемной цепи

$$\mathcal{U}_{\text{п.ц0}} = \mathcal{E}_0 + \mathcal{U}_{\text{тp0}} - I_{\text{к}} R1 = 0, \quad (1)$$

где  $I_{\text{к}}$  — сила тока в компенсационной цепи.

В присутствии магнитной среды ЭДС приемной катушки изменится до величины

$$\mathcal{E} = (\mathcal{E}_0 + \Delta\mathcal{E} + \Delta\mathcal{E}_{\text{п}}) \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta\mathcal{E}$  — приращение ЭДС в результате взаимодействия генераторная катушка — слабомагнитная среда с магнитной восприимчивостью  $\chi$  — приемная катушка (полезный сигнал);  $\Delta\mathcal{E}_{\text{п}}$  — дополнительная ЭДС (помеха), появляющаяся вследствие взаимодействия намагниченного первичным полем сердечника приемной катушки со средой;  $\omega_0$  и  $\omega$  — круговые частоты генерации в воздухе и в присутствии среды.

Приращение  $\Delta\mathcal{E}$  выражается известным соотношением:

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 G \chi, \quad (3)$$

где  $G$  — рассчитываемый геометрический фактор. Относительное приращение  $\Delta\mathcal{E}_{\text{п}}/\mathcal{E}_0$  практически совпадает с относительным изменением индуктивности приемной катушки  $L_{\text{п}}$  под воздействием магнитной среды [3]:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{п}}/\mathcal{E}_0 = \Delta L_{\text{п}}/L_{\text{п0}}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{п0}}$  — индуктивность приемной катушки в воздухе;  $\Delta L_{\text{п}}$  — ее приращение под влиянием среды.

Круговые частоты генерации на основании формулы Томсона соответственно равны

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{\text{г0}}C} \quad \text{и} \quad \omega = 1/\sqrt{(L_{\text{г0}} + \Delta L_{\text{г}})C},$$

где  $L_{\text{г0}}$  — индуктивность генераторной катушки в воздухе, а  $\Delta L_{\text{г}}$  — ее приращение под влиянием среды. Из этих равенств с учетом малости относительного приращения

$\Delta L_{\Gamma}/L_{\Gamma 0}$  следует

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta L_{\Gamma}/L_{\Gamma 0}}} \cong 1 - \frac{1}{2} \Delta L_{\Gamma}/L_{\Gamma 0}. \quad (5)$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора изменяется пропорционально силе тока в генераторной цепи. В присутствии магнитной среды это напряжение составляет

$$U_{\text{тр}} = U_{\text{тр}0}(I_{\Gamma}/I_{\Gamma 0}), \quad (6)$$

где  $I_{\Gamma 0}$  и  $I_{\Gamma}$  — сила тока соответственно в воздухе и при наличии среды.

Благодаря цепи автоматической регулировки усиления напряжение на любой обмотке генераторной катушки поддерживается неизменным по амплитуде. В частности, в процессе измерений сохраняется напряжение на питаемой обмотке  $L1$ :

$$I_{\Gamma 0} \omega_0 L_{\Gamma 0} = I_{\Gamma} \omega (L_{\Gamma 0} + \Delta L_{\Gamma}).$$

Из этого равенства следует отношение токов

$$\frac{I_{\Gamma}}{I_{\Gamma 0}} = \frac{1}{1 + \Delta L_{\Gamma}/L_{\Gamma 0}} \frac{\omega_0}{\omega} \cong \left(1 - \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) \frac{\omega_0}{\omega},$$

что позволяет формулу (6) представить в виде

$$U_{\text{тр}} = U_{\text{тр}0} \left(1 - \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) \frac{\omega_0}{\omega}. \quad (7)$$

Напряжение  $U_{\text{п.ц}}$  на выходе приемной цепи получим суммированием формул (2) и (6) с учетом соотношения (3) и при условии замены в них отношений круговых частот на основании равенства (5) и добавления компенсационного напряжения  $I_{\text{к}}R1$ :

$$U_{\text{п.ц}} = \left(\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon + \varepsilon_0 \frac{\Delta L_{\text{п}}}{L_{\text{п}0}}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) + U_{\text{тр}0} \left(1 - \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) - I_{\text{к}}R1.$$

Компенсационное напряжение  $I_{\text{к}}R1$  не подвержено воздействию исследуемой среды в случае режима холостого хода для приемной цепи, так как сила компенсационного тока  $I_{\text{к}}$ , равная отношению стабилизированного напряжения на обмотке  $L4$  к полному сопротивлению резисторного делителя, сохраняется неизменной.

Раскрывая скобки и опуская произведения малых множителей как величин второго порядка малости, находим

$$U_{\text{п.ц}} = \varepsilon_0 + U_{\text{тр}0} - I_{\text{к}}R1 + \Delta\varepsilon + \varepsilon_0 \left(\frac{\Delta L_{\text{п}}}{L_{\text{п}0}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) - \frac{1}{2} U_{\text{тр}0} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}.$$

С учетом условия компенсации (1) следует, что

$$U_{\text{п.ц}} = \Delta\varepsilon + \varepsilon_0 \left(\frac{\Delta L_{\text{п}}}{L_{\text{п}0}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}\right) - \frac{1}{2} U_{\text{тр}0} \frac{\Delta L_{\Gamma}}{L_{\Gamma 0}}. \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), к полезному сигналу  $\Delta\varepsilon$  добавляется помеха, характеризующая последними слагаемыми. Величина помехи не поддается расчету (без привлечения экспериментальных данных), ухудшает геометрический фактор и снижает точность измерений.

Из формулы (8) следует возможность самокомпенсации помехи при соблюдении двух условий.

Первое условие выражает равенство относительных изменений индуктивностей генераторной и приемной катушек под воздействием среды:

$$\frac{\Delta L_{\text{п}}}{L_{\text{п}0}} = \frac{\Delta L_{\text{г}}}{L_{\text{г}0}}. \quad (9)$$

Отношения  $\Delta L_{\text{п}}/L_{\text{п}0}$  и  $\Delta L_{\text{г}}/L_{\text{г}0}$  не зависят от числа витков в каждой катушке. Следовательно, условие (9) соблюдается, если в катушках индуктивностей применены практически идентичные ферромагнитные сердечники, а геометрическая конструкция зонда способствует одинаковому расположению катушек относительно исследуемой среды. Это условие несколько нарушается на контактах пласта и в случае неоднородной среды, но практически соблюдается для поинтервально усредненных значений  $\varepsilon$ .

Второе условие представляет равенство напряжения на вторичной обмотке трансформатора в воздухе и первичной ЭДС приемной катушки:

$$U_{\text{тр}0} = \mathcal{E}_0. \quad (10)$$

Для достижения равенства (10) сначала подбирается количество витков во вторичной, повышающей обмотке трансформатора, а затем — соотношение между сопротивлениями  $R_5$ ,  $R_6$  резисторного делителя напряжения.

Для достижения глубокой компенсации на выходе приемной цепи зонда в воздухе напряжение на вторичной обмотке трансформатора должно совпадать по фазе с первичной ЭДС приемной катушки. Для этого добротность первичной обмотки трансформатора должна быть такой же, как у генераторной катушки. Кроме того, температурная стабильность компенсации реализуется лишь при низком температурном коэффициенте действующей магнитной проницаемости сердечника трансформатора. Магнитопровод трансформатора можно создать, например, из нескольких ферритовых колец, которые затем разрезаются в направлении общей оси. Благодаря появляющемуся зазору существенно снижаются действующая проницаемость и ее температурный коэффициент, а также облегчается намотка провода.

На практике иногда используется зонд, у которого катушки имеют ферромагнитные сердечники, но в генераторной цепи отсутствует резонансный конденсатор. В этом случае частота генератора не зависит от воздействия исследуемой среды на генераторную катушку. Полагая в формулах (2) и (7)  $\omega = \omega_0$  и суммируя их, находим напряжение на выходе приемной цепи:

$$U_{\text{п.ц}} = \mathcal{E}_0 + \Delta \mathcal{E} + \Delta \mathcal{E}_{\text{п}} + U_{\text{тр}0} \left( 1 - \frac{\Delta L_{\text{г}}}{L_{\text{г}0}} \right) - I_{\text{к}} R_1.$$

Подставляя в это равенство условие (1) компенсации напряжения в воздухе и заменяя  $\Delta \mathcal{E}_{\text{п}} = \mathcal{E}_0(\Delta L_{\text{п}}/L_{\text{п}0})$ , находим

$$U_{\text{п.ц}} = \Delta \mathcal{E} + \mathcal{E}_0 \frac{\Delta L_{\text{п}}}{L_{\text{п}0}} - U_{\text{тр}0} \frac{\Delta L_{\text{г}}}{L_{\text{г}0}}. \quad (11)$$

Как следует из соотношения (11) сигналы-помехи, возникающие в результате индивидуального взаимодействия каждой катушки со слабомангнитной средой, взаимно

гасят друг друга при соблюдении условий (9) и (10). В формуле (11) сохраняется лишь первое слагаемое  $\Delta\mathcal{E}$ , характеризующее взаимодействие: генераторная катушка — слабомагнитная среда — приемная катушка и представляемое формулой (3).

Измерения с таким зондом над моделью однородного полупространства с известной магнитной восприимчивостью позволили определить значения геометрического фактора  $G = \Delta\mathcal{E}/(\mathcal{E}_0\mathfrak{a})$ . Оказалось, что экспериментальные значения  $G$  в пределах погрешности измерений совпадают с теоретическими, расчетными значениями геометрического фактора, если соблюдаются условия (9) и (10). При отключении же схемы компенсации однокатушечных эффектов наблюдается значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями  $G$  [12].

## Градуировка прибора

В воздухе сумма первичной ЭДС приемной катушки и равного ей в силу условия (10) напряжения на вторичной обмотке трансформатора согласно формуле (1) компенсируется падением напряжения на резисторе  $R1$ :  $2\mathcal{E}_0 = I_k R1$ . При включении в приемную цепь через переключатель  $S$  резистора  $R2$  появляется стандартный сигнал  $\Delta\mathcal{U}_{ст} = I_k R2$ , который после нормирования по  $\mathcal{E}_0$  составляет

$$\Delta\mathcal{U}_{ст}/\mathcal{E}_0 = 2R2/R1.$$

Далее на основании равенства (3)  $\Delta\mathcal{U}_{ст} = \mathcal{E}_0 G \mathfrak{a}_{гр}$  градуировочный сигнал можно выразить в единицах магнитной восприимчивости:

$$\mathfrak{a}_{гр} = 2 \frac{R2}{R1} \frac{1}{G}. \quad (12)$$

## Индукционный зонд с фокусирующей катушкой

В некоторых случаях для улучшения вертикальной характеристики зонда в его электрическую схему приходится добавлять фокусирующую катушку, включаемую в приемную цепь последовательно и встречно с приемной катушкой  $L2$  и вторичной обмоткой трансформатора  $L7$ . Фокусирующая катушка располагается вблизи генераторной и в ней нецелесообразно использовать ферромагнитный сердечник. Последний создавал бы дополнительные неконтролируемые сигналы из-за его взаимодействия с сердечниками основных катушек индукционного зонда и средой.

Полезный сигнал  $\Delta\mathcal{E}$  представляет собой разность вторичных ЭДС приемной и фокусирующей катушек:

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_{п0} G_{г.п} \mathfrak{a} - \mathcal{E}_{ф0} G_{г.ф} \mathfrak{a}, \quad (13)$$

где  $\mathcal{E}_{п0}$ ,  $\mathcal{E}_{ф0}$  — первичные ЭДС этих катушек, а  $G_{г.п}$ ,  $G_{г.ф}$  — их геометрические факторы. Если в качестве нормировочной использовать первичную ЭДС приемной катушки ( $\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_{п0}$ ) и ввести коэффициент степени фокусировки  $\tau = \mathcal{E}_{ф0}/\mathcal{E}_{п0}$ , то формула (13) преобразуется к традиционному виду (3) при условии определения геометрического фактора зонда по соотношению

$$G = G_{г.п} - \tau G_{г.ф}. \quad (14)$$



В воздухе сумма разностей первичных ЭДС  $\mathcal{E}_{п0} - \mathcal{E}_{ф0} = \mathcal{E}_0(1 - \tau)$  и напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $\mathcal{U}_{тp0}$  компенсируются падением напряжения на резисторе  $R1$ :

$$\mathcal{U}_{п.ц0} = \mathcal{E}_0(1 - \tau) + \mathcal{U}_{тp0} - I_{к}R1 = 0. \quad (15)$$

В присутствии слабомагнитной среды разностная ЭДС приемной и фокусирующей катушек с учетом формулы (13) изменится до величины

$$[\mathcal{E}_0(1 - \tau) + \Delta\mathcal{E} + \Delta\mathcal{E}_{п}] \frac{\omega}{\omega_0},$$

а напряжение на вторичной обмотке трансформатора выразится формулой (7). Вследствие этого при замене  $\Delta\mathcal{E}_{п}$  по формуле (4) находим напряжение на выходе приемной цепи

$$\mathcal{U}_{п.ц} = [\mathcal{E}_0(1 - \tau) + \Delta\mathcal{E} + \mathcal{E}_0(\Delta L_{п}/L_{п0})] \frac{\omega}{\omega_0} + \mathcal{U}_{тp0} \left(1 - \frac{\Delta L_{г}}{L_{г0}}\right) \frac{\omega_0}{\omega} - I_{к}R1.$$

С помощью равенства (5) заменим отношение круговых частот

$$\mathcal{U}_{п.ц} = [\mathcal{E}_0(1 - \tau) + \Delta\mathcal{E} + \mathcal{E}_0\Delta L_{п}/L_{п0}](1 - 0,5\Delta L_{г}/L_{г0}) + \mathcal{U}_{тp0}(1 - \Delta L_{г}/L_{г0})(1 + 0,5\Delta L_{г}/L_{г0}) - I_{к}R1.$$

Сохраняя в этом равенстве слагаемые до первого порядка малости включительно и используя условие компенсации (15), находим

$$\mathcal{U}_{п.ц} = \Delta\mathcal{E} + \mathcal{E}_0 \left[ \frac{\Delta L_{п}}{L_{п0}} - 0,5(1 - \tau) \frac{\Delta L_{г}}{L_{г0}} \right] - 0,5\mathcal{U}_{тp0} \frac{\Delta L_{г}}{L_{г0}}. \quad (16)$$

Как следует из формулы (16) однокатушечные эффекты взаимно компенсируются и выходной сигнал  $\mathcal{U}_{п.ц} = \Delta\mathcal{E}$ , если соблюдается прежнее условие (9), но второе условие (10) при наличии фокусирующей катушки должно быть заменено соотношением

$$\mathcal{U}_{тp0} = (1 + \tau)\mathcal{E}_0. \quad (17)$$

Если равенство (17) ввести в формулу (15), то суммарное напряжение на приемной катушке, вторичной обмотке трансформатора и фокусирующей катушке в воздухе остается прежним:  $2\mathcal{E}_0 = I_{к}R1$ . Это означает, что сохраняет силу формула (12) для определения градуировочного сигнала, но его величина изменяется из-за использования нового геометрического фактора (14).

Таким образом, в статье рассмотрены вопросы проектирования высокочувствительного индукционного зонда для измерения магнитной восприимчивости горных пород с учетом однокатушечных взаимодействий генераторной, фокусирующей и приемной катушек с исследуемой средой. Выполнен анализ способов увеличения чувствительности зонда. Рассмотрены электрическая схема зонда и типовая структурная схема прибора.

## Указатель литературы

1. *Кудрявцев Ю. И., Мейер В. А.* Способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки в аппаратуре каротажа магнитной восприимчивости // Вопросы геофизики. 1969. Вып. 19. С. 70–73.
2. *Кудрявцев Ю. И.* Способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки с ферромагнитным сердечником: А.с. № 506821. 1976. БИ. № 10.
3. *Кудрявцев Ю. И.* Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в естественных условиях. Л.: Недра, 1978. 240 с.
4. *Кудрявцев Ю. И., Микляев Ю. В., Тихонов Б. Н.* Исследование индукционного зонда с параллельными катушками // Геофиз. аппаратура. 1980. Вып. 71. С. 12–35.
5. *Кудрявцев Ю. И.* Влияние магнитного момента приемной катушки на результаты измерений с двухкатушечным зондом // Геофиз. аппаратура. 1969. Вып. 41. С. 123–126.
6. *Кудрявцев Ю. И., Микляев Ю. В., Уральский Л. Н.* Индукционные зонды с компенсацией магнитного потока приемной катушки // Геофиз. аппаратура. 1989. Вып. 90. С. 14–21.
7. *Кудрявцев Ю. И., Микляев Ю. В., Уральский Л. Н.* Зонд для измерения магнитной восприимчивости и удельной электропроводности (его варианты): А.с. № 1231448 // 1986. БИ. № 18.
8. *Кудрявцев Ю. И., Шульгин В. С.* Устройство для измерений электромагнитных параметров материалов: А.с. № 1602190. 1990.
9. *Кудрявцев Ю. И., Шульгин В. С.* Генератор: А.с. № 1620018. 1990.
10. *Кудрявцев Ю. И., Шульгин В. С.* Лабораторные измерения магнитной восприимчивости и ее составляющих // Вопросы геофизики. 1998. Вып. 35. С. 259–267.
11. *Кудрявцев Ю. И., Микляев Ю. В., Уральский Л. Н.* Зонд для измерения магнитной восприимчивости: А.с. № 1038912. 1983. БИ. № 32.
12. *Кудрявцев Ю. И., Микляев Ю. В., Уральский Л. Н.* Индукционный зонд с параллельными катушками для измерения магнитной восприимчивости среды // Вопросы геофизики. 1983. Вып. 30. С. 211–227.