

УДК 620.179.14

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Коннов В. В.

*ЗАО Научно-производственный центр «МОЛНИЯ», г. Москва  
e-mail: molkon@bk.ru*

***Аннотация.** Получены аналитические выражения для расчета комплексных показателей чувствительности и помехоустойчивости магнитометрического метода бесконтактного контроля НДС металла подземного стального трубопровода. Рассмотрены варианты схем измерения напряженности магнитного поля трубопровода. Для обеспечения высокой чувствительности и помехозащищенности магнитометрических измерений рекомендованы схемы измерения с расположением преобразователей магнитного поля в области экстремумов пространственных составляющих напряженности магнитного поля.*

***Ключевые слова:** оптимизация, магнитометрический метод, магистральный трубопровод, контроль НДС, магнитометрический датчик, напряжённость магнитного поля.*

Магнитное поле стального трубопровода (ТП), создаваемое за счет намагничивания металла в геомагнитном поле Земли, формируется под влиянием действующих на металл механических напряжений. Так как механические напряжения влияют на магнитные свойства металла, то их неравномерное распределение вдоль ТП приводит к возникновению неоднородности в топографии магнитного поля над ТП (рис. 1). На выявлении неоднородностей в распределении магнитного поля в пространстве над ТП в процессе его непрерывного сканирования основан магнитометрический метод бесконтактного контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) металла [1-3]. На базе магнитометрического метода контроля НДС металла подземных ТП специалистами ЗАО НПЦ «МОЛНИЯ» разработан приборный комплекс М-1 для бесконтактной диагностики газопроводов, позволяющий обнаруживать зоны концентрации механического напряжения (ЗКН) металла ТП [4, 5].

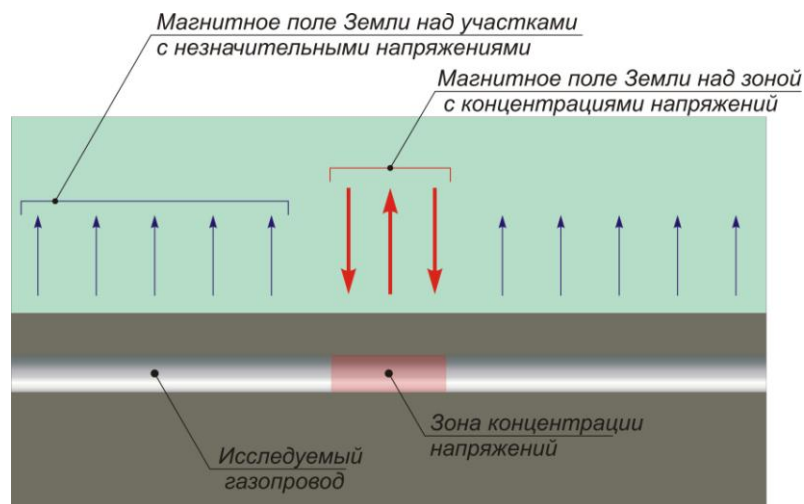


Рис. 1. Схема формирования магнитного поля стального трубопровода с ЗКН металла

Схема магнитометрического комплекса М-1 для контроля подземного ТП показана на рисунке 2.

Распределение напряженности магнитного поля над ТП измеряется компьютеризированным блоком прибора М-1, который регистрирует все пространственные составляющие напряженности магнитного поля и их изменение (градиент) по выбранным направлениям системы координат. Для этого магнитометрические датчики (МД) - преобразователи магнитного поля, пространственно разнесены друг от друга на некоторое расстояние (рисунок 2).

На показания измерительного блока влияет множество факторов, основными из которых являются изменение глубины залегания стального трубопровода (при постоянном расстоянии МД от поверхности Земли) и изменение магнитных свойств металла стальной трубы под воздействием механических напряжений. Для установления участка ТП с ЗКН металла необходимо отстраиваться от влияния на показания прибора М-1 глубины залегания ТП.

Напряженность магнитного поля ТП формируется в сравнительно слабом магнитном поле Земли, которое также относится к классу слабых магнитных полей, вследствие чего на результаты магнитометрического

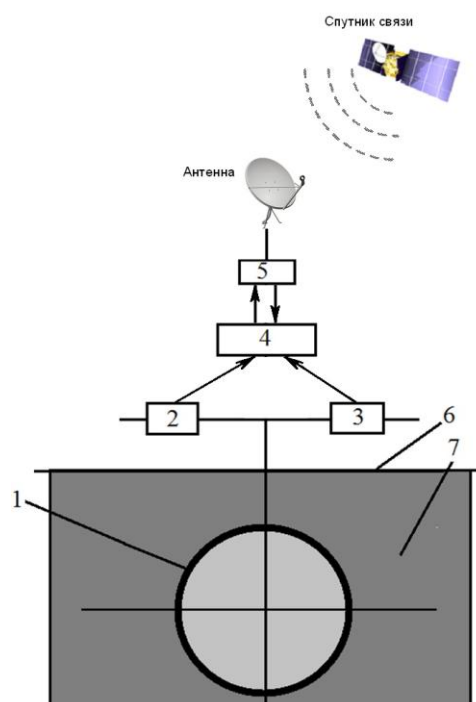


Рис. 2. Схема магнитометрического контроля подземных стальных трубопроводов прибором М-1 (1 – МГ, 2, 3 – МД, 4 – компьютеризированный измерительный блок, 5 – GPS-навигатор, 6 – поверхность Земли, 7 - грунт)

контроля существенно влияют случайные шумы и помехи от посторонних источников. Выбор параметров измерительного блока, близких к оптимальным, позволяет существенно повысить уровень измеряемых сигналов, величину соотношения «сигнал/шум» и увеличивает надежность контроля.

Оптимизация параметров измерительного блока обеспечивается соответствующим расположением МД в пространстве и относительно друг друга, которое определяется исходя из особенностей измеряемого магнитного поля. Поэтому для решения этой задачи предварительно рассмотрим природу магнитоэлектростатического поля ТП, формируемого во внешнем постоянном геомагнитном поле Земли, и найдём для него соответствующие аналитические выражения (рисунок 3).

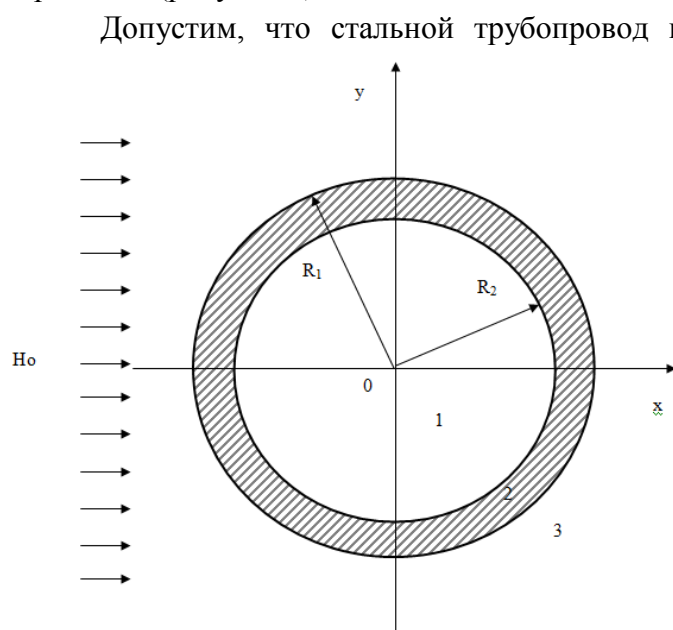


Рис.3. К расчету напряженности магнитного поля стального трубопровода в геомагнитном поле Земли

составляющей магнитного поля Земли  $H_0$ . Напряженность магнитного поля  $H_0$  вдоль оси  $z$ , по которому направлена ось ТП, остается постоянной, так как здесь рассматривается ТП без ЗКН металла. В этом случае расчет напряженности магнитного поля стального трубопровода в пространстве осуществляется на плоскости  $XU$  (рис. 3).

При отсутствии на поверхности металла ТП сторонних электрических

токов, потенциал его магнитного поля в любой точке пространства удовлетворяет уравнению Лапласа [6]:

$$\Delta \varphi_i = 0, \quad (1)$$

где индексы  $i = 1, 2, 3$  соответствуют внутренней области трубы, области металла стальной трубы и области вне стальной трубы, соответственно.

В цилиндрической системе координат напряженность магнитного поля ТП зависит лишь от радиус-вектора  $r$  и полярного угла  $\alpha$  точки наблюдения, поэтому уравнение Лапласа для его потенциала имеет следующий вид:

$$\Delta \varphi_i = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (2)$$

Решая дифференциальное уравнение (2) методом разделения переменных (методом Фурье), получаем общее решение для потенциалов магнитного поля

стальной трубы в средах в следующем виде:

$$\varphi_i = \left( C_{2i-1} r + \frac{C_{2i}}{r} \right) \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $C_{2i-1}$ ,  $C_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) – постоянные интегрирования, которые определяются на основе граничных условий на поверхностях ТП:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r=R_1) &= \varphi_2(r=R_1), & \varphi_2(r=R_2) &= \varphi_3(r=R_2), \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} &= \mu \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, & \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} \Big|_{r=R_2} &= \mu \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

В результате расчетов, с учетом условий (3)–(4), получаем следующее аналитическое выражения для потенциала магнитного поля над ТП:

$$\varphi_3 = -H_0 r \cos \alpha + H_0 R_1^2 \frac{\left( \mu^2 - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \right)}{(\mu + 1)^2 \left( 1 - \beta^2 \frac{R_2}{R_1} \right)} \frac{\cos \alpha}{r}, \quad \text{который в декартовой}$$

системе координат имеет вид:

$$\varphi_3(x, y) = -H_0 x + H_0 R_1^2 \frac{\left( \mu^2 - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \right)}{(\mu + 1)^2 \left( 1 - \beta^2 \frac{R_2}{R_1} \right)} \frac{x}{x^2 + y^2}, \quad (5)$$

где  $\beta = \frac{\mu - 1}{\mu + 1}$ .

Составляющие магнитного поля в пространстве над ТП определяются по формулам:

$$H_x(x, y) = -\frac{\partial \varphi_3(x, y)}{\partial x}, \quad H_y(x, y) = -\frac{\partial \varphi_3(x, y)}{\partial y}. \quad (6)$$

Подставив потенциал магнитного поля (5) в формулы (6) получаем следующие выражения для определения  $x$ - и  $y$ -составляющих напряженности магнитного поля над ТП:

$$H_x(x, y) = H_0 - H_0 R_1^2 \frac{\left( \mu^2 - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \right)}{(\mu + 1)^2 \left( 1 - \beta^2 \frac{R_2}{R_1} \right)} \frac{y^2 - x^2}{\left( x^2 + y^2 \right)^2}, \quad (7a)$$

$$H_y(x, y) = H_0 R_1^2 \frac{(\mu^2 - 1) \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right)}{(\mu + 1)^2 \left(1 - \beta^2 \frac{R_2}{R_1}\right)} \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (76)$$

В формулах (7) параметр  $y = R_1 + uz$ , где  $uz$  – глубина залегания стальной трубы (расстояние от поверхности Земли до внешней поверхности стальной трубы),  $R_1 = R_2 + t$  ( $t$  – толщина стенки стальной трубы).

На рис. 4 показаны распределения составляющих напряженности магнитного поля над стальной трубой при разной глубине её залегания в грунте, полученные на основе формул (7).

Топография  $x$ -составляющей напряженности магнитного поля над стальной трубой является однополярной, экстремум которой располагается над осью трубы (рис. 4а). Напряженность  $x$ -составляющей суммарного магнитного поля над стальной трубой уменьшается из-за искривления силовых линий магнитного поля.

Топография  $y$ -составляющей напряженности магнитного поля над стальной трубой является дипольной, при этом над осью трубы зависимость переходит через нулевое значение (рис. 4б).

С увеличением глубины залегания стальной трубы амплитудные значения составляющих

напряженностей магнитного поля уменьшаются примерно по гиперболическому закону (рис. 5). Относительное изменение напряженности магнитного поля с

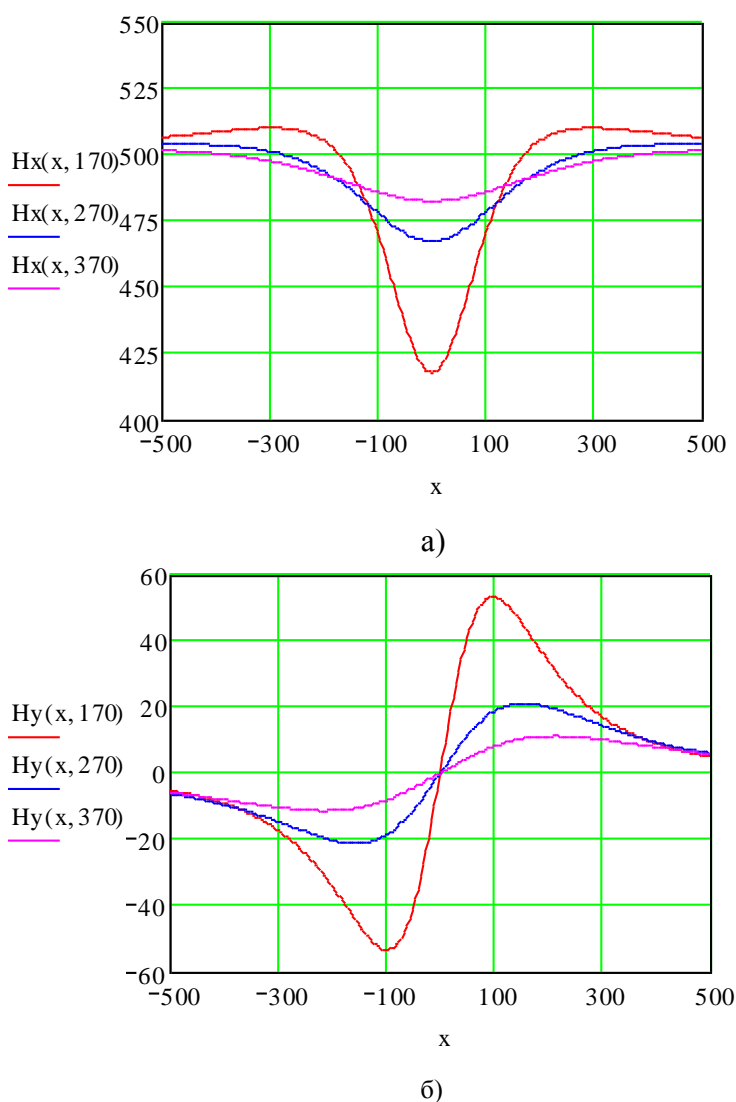


Рис. 4. Распределение  $x$ - (а) и  $y$ -составляющей (б) напряженности магнитного поля над стальной трубой в геомагнитном поле Земли:  $R_1 = 700$  мм,  $t = 10$  мм,  $H_0 = 50$  А/м,  $\mu = 800$  (сталь 09Г2С).  $l$  – глубина залегания стальной трубы  $uz = 100$  см, 2 – 200 см, 3 – 300 см.

изменением глубины залегания не зависит от диаметра стальной трубы, однако абсолютные значения амплитуды напряженности магнитного поля трубы большего диаметра спадают медленнее, чем амплитуда магнитного поля стальных труб меньшего диаметра.

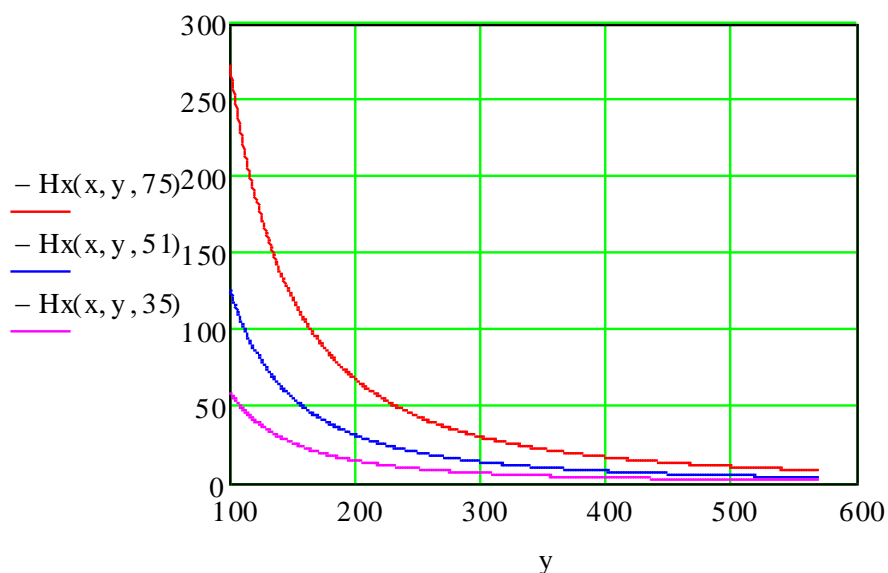


Рис. 5. Зависимость амплитуды  $x$ -составляющей напряженности магнитного поля над стальной трубой от глубины залегания  $t = 10$  мм,  $H_0 = 50$  А/м,  $\mu = 800$  (сталь 09Г2С)  
– внешний радиус трубы  $R_v = 750$  мм, 2 – 510 мм, 3 – 350 мм.

Увеличение глубины залегания стальной трубы приводит к расширению топографии  $y$ -составляющей напряженности магнитного поля, при этом зависимость расстояния между экстремумами топографии магнитного поля от глубины залегания имеет линейный характер, независимо от диаметра стальной трубы (рис. 6).

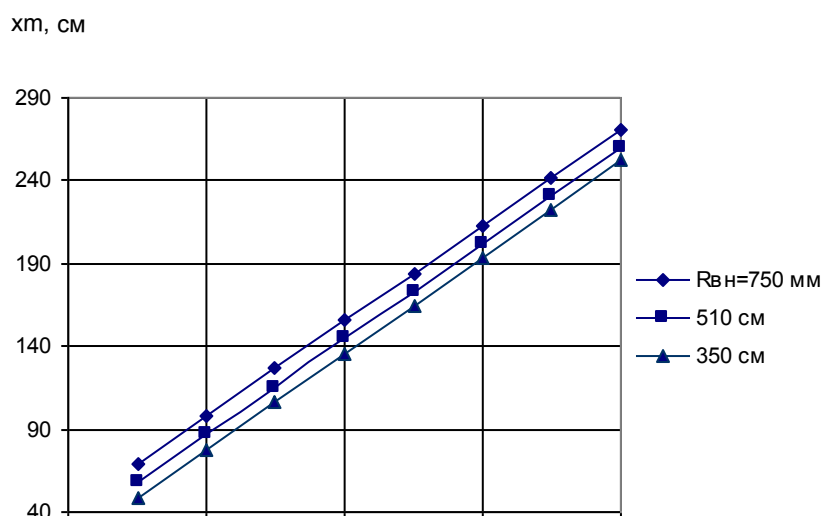


Рисунок 6. Зависимость расстояния между экстремумами  $y$ -составляющей напряженности магнитного поля над стальной трубой от глубины залегания  $t = 10$  мм,  $H_0 = 50$  А/м,  $\mu = 800$  (сталь 09Г2С)

Из формул (7) видно, что напряженность магнитного поля стальной трубы можно представить как произведение двух факторов:

- амплитудного фактора, определяемого внешним магнитным полем и магнитными свойствами металла стальной трубы;
- топографического фактора, зависящего от координаты точки пространства над стальной трубой.

Так как НДС металла стальной трубы влияет на его магнитные свойства, то наличие ЗКН металла в стальной трубе будет приводить, в основном, к изменению амплитуды напряженности магнитного поля стальной трубы, при этом топография распределения магнитного поля практически не изменится. Поэтому области ТП с ЗКН металла целесообразно искать по изменению амплитуды измеряемых составляющих напряженности магнитного поля над стальной трубой.

Для надежного выявления ЗКН металла на стальной трубе по амплитуде сигнала, измерительный блок магнитометрического прибора должен обеспечивать оптимальное соотношение «сигнал – помеха».

В работе [7] на примере магнитного поля точечного включения в металле показано, что измерение градиента напряженности магнитного поля дает эффективные результаты лишь в случае однородности магнитного поля внешних случайных помех. При влиянии случайных помех, распределенных в пространстве неоднородно, эффективность разных способов измерения градиента напряженности магнитного поля в пространстве является различной. Следует заметить, что случайные помехи при магнитометрическом контроле ТП в основном являются пространственно неоднородными.

Другой особенностью измерения градиента напряженности магнитного поля является то, что с подавлением влияния случайных помех одновременно

происходит уменьшение чувствительности градиентометра к измеряемому полезному сигналу.

В связи с этим обстоятельством оптимальную схему измерения амплитуды и градиента напряженности магнитного поля стальной трубы следует выбирать исходя из результатов соответствующих расчетов.

На основе зависимостей, показанных на рисунке 4, можно сделать заключение о том, что для обеспечения наибольшей величины соотношения «сигнал-помеха», амплитудное значение  $x$ -составляющей напряженности магнитного поля над стальной трубой следует измерять в точке с координатой  $x = 0$ ,  $y > 0$ , амплитудное значение  $y$ -составляющей напряженности магнитного поля следует измерять в точках расположения экстремумов  $x_m$ , определяемых согласно рис. 6.

При измерении градиента напряженности магнитного поля величина соотношения «сигнал-помеха» определяется следующей формулой [8]:

$$\beta = \frac{H_1 - H_2}{l \operatorname{grad}(H_n)}, \quad (8)$$

где  $H_1$ ,  $H_2$  – значения напряженности магнитного поля, влияющие на 1 и 2 преобразователь магнитного поля,  $l$  – расстояние между центрами преобразователей магнитного поля,  $\operatorname{grad}(H_n)$  – градиент напряженности магнитного поля случайных помех.

Из формулы (8) видно, что наличие в пространстве неоднородных помех приводит к существенному снижению чувствительности градиентометра.

Применительно к магнитометрическому контролю НДС металла ТП, рассмотрим следующие схемы измерения градиента напряженности магнитного поля (рис. 7).

Градиентометрическая схема (рис.7а): выходной сигнал градиентометра пропорционален величине  $\operatorname{grad}_y(H_{x_m})$ .

Величины напряженности магнитного поля ТП в точках расположения МД равны:

$$H_{x1}^m = H_0 - AF \frac{1}{y^2}, \quad H_{x2}^m = H_0 - AF \frac{1}{(y+1)^2},$$

при этом:  $H_{x1}^m - H_{x2}^m = AF \frac{1}{y^2} k(\alpha)$ ,

где,  $AF$  – амплитудный фактор магнитного поля стальной трубы,

$$k(\alpha) = 1 - \frac{1}{(\alpha+1)^2} \quad (9)$$

- геометрический параметр чувствительности градиентометра, параметр  $\alpha = l/y$ .

Согласно работе [7], параметр помехоустойчивости для данной схемы измерения градиента напряженности магнитного поля определяется по формуле:



$$\gamma(\alpha) = \frac{k(\alpha)}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{1}{(\alpha+1)^2} \right]. \quad (10)$$

Зависимости параметров чувствительности и помехоустойчивости градиентометра от параметра  $\alpha$ , определенные по формулам (9) – (10), показаны на рис. 8 а).

Градиентометрическая схема (рисунок 7б): выходной сигнал градиентометра пропорционален величине  $\text{grad}x(H_x)$ .

Величины напряженности магнитного поля стального трубопровода в точках расположения преобразователей магнитного поля равны:

$$H_{x1} = H_0 - AF \frac{1}{y^2}, \quad H_{x2} = H_0 - AF \frac{y^2 - 1^2}{(y^2 + 1^2)^2},$$

при этом:  $H_{x1} - H_{x2} = AF \frac{1}{y^2} k(\alpha)$ ,

где,  $AF$  – амплитудный фактор магнитного поля стальной трубы,

$$k(\alpha) = 1 + \frac{\alpha^2 - 1}{(\alpha + 1)^2} \quad (11)$$

- геометрический параметр чувствительности градиентометра.

Параметр помехоустойчивости для данной схемы измерения градиента напряженности магнитного поля равен:

$$\gamma(\alpha) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 + \frac{\alpha^2 - 1}{(\alpha + 1)^2} \right]. \quad (12)$$

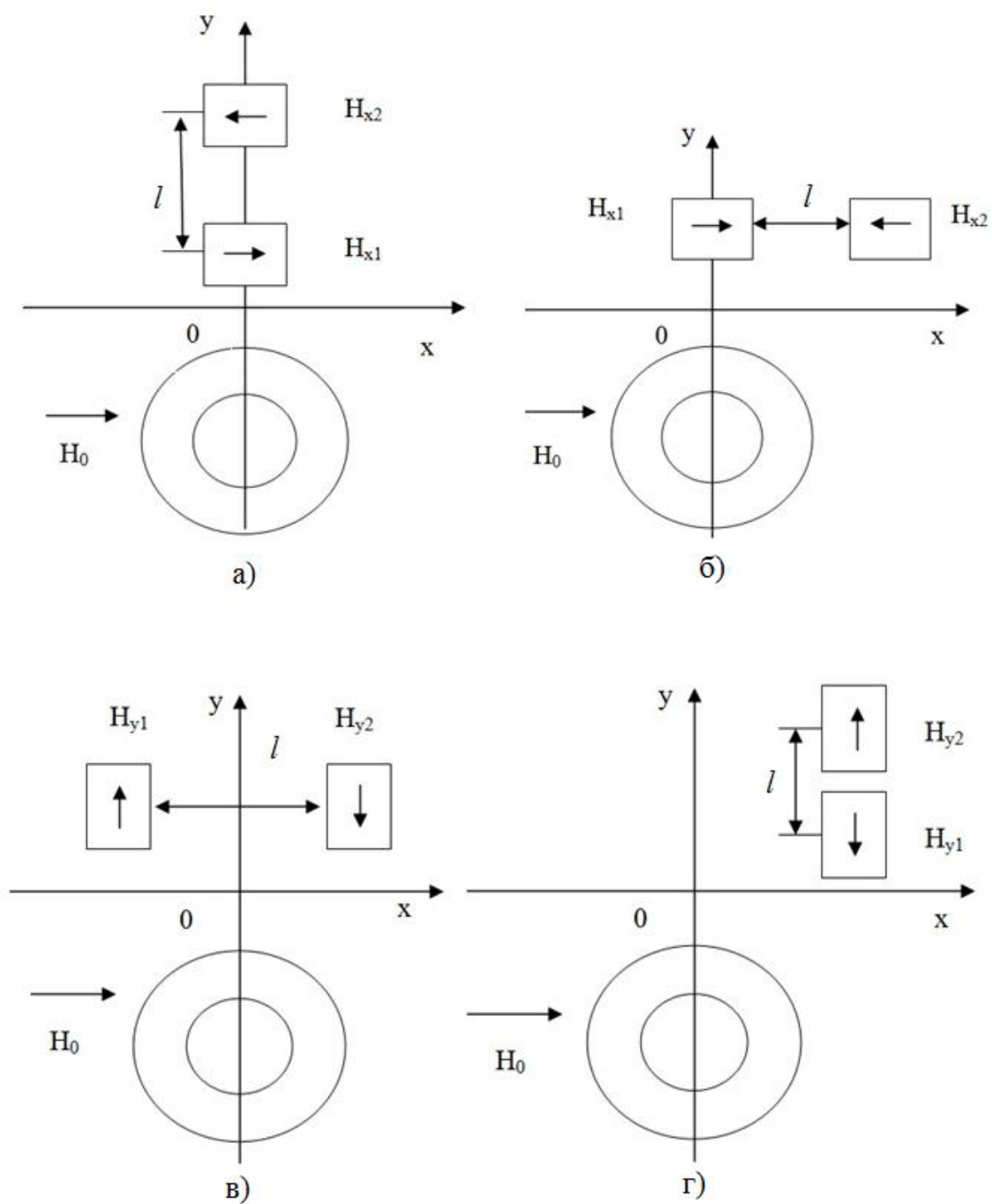
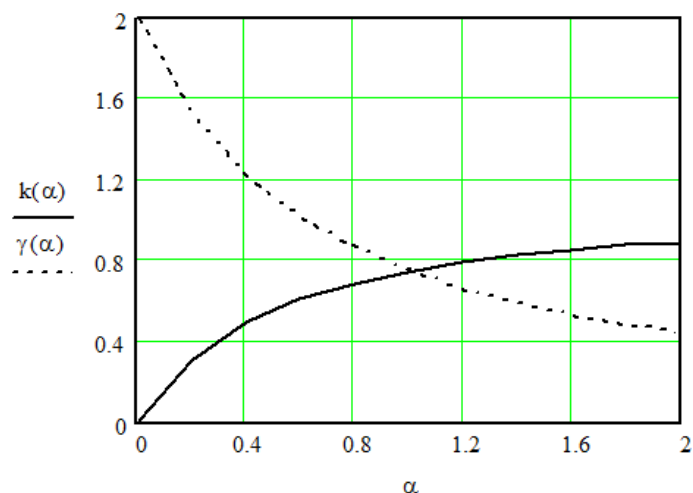
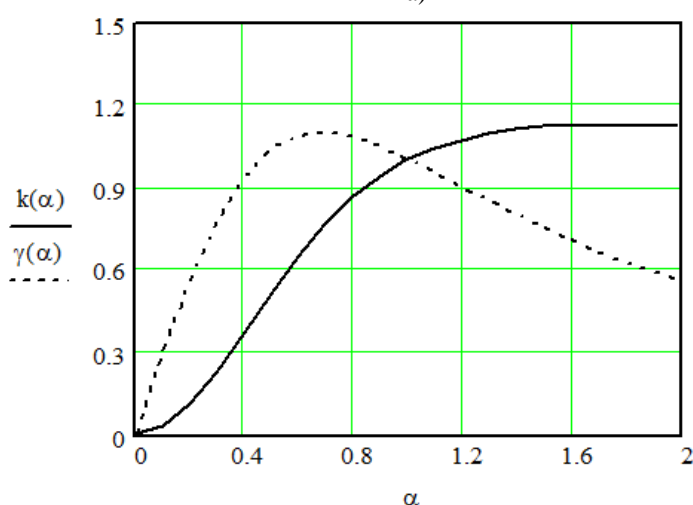


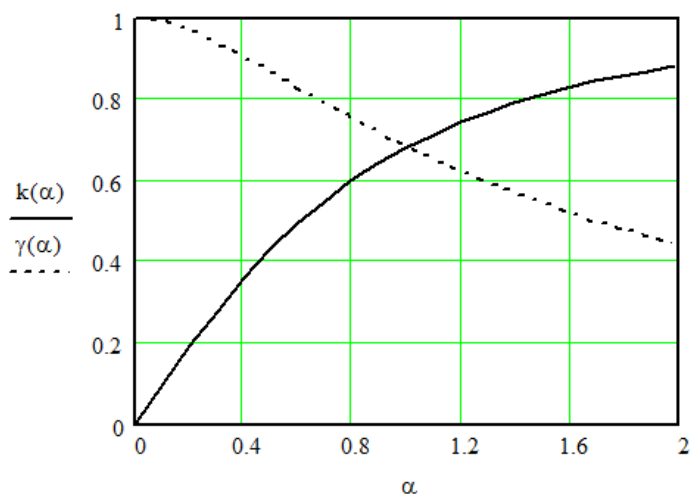
Рис. 7. Схемы измерения градиента напряженности магнитного поля стального трубопровода



а)



б)



в)

Рис. 8. Кривые параметров чувствительности и помехоустойчивости схем измерения градиента напряженности магнитного поля стального трубопровода:

а) – схема по рис. 7а, б) – схема по рис. 7б, в) – схема по рис. 7г

Зависимости параметров чувствительности и помехоустойчивости градиентометра от параметра  $\alpha$ , определенные по формулам (11) – (12), показаны на рис. 8б).

Расчеты показывают, что параметры чувствительности и помехоустойчивости для градиентометрической схемы по рисунку 7в полностью совпадают с параметрами вышерассмотренной градиентометрической схемы по рисунку 7а.

Градиентометрическая схема по рис. 7г: выходной сигнал градиентометра пропорционален величине  $\text{grad}_y(H_y)$ .

Величины напряженности магнитного поля ТП в точках расположения преобразователей магнитного поля равны:

$$H_{y1} = AF \frac{2x_m y}{(x_m^2 + y^2)^2}, \quad H_{y2} = AF \frac{2x_m (y+1)}{[x_m^2 + (y+1)^2]^2},$$

при этом, с учетом зависимости параметра  $x_m(y)$  (рис.4):

$$H_{y1} - H_{y2} = AF \frac{2x_m y}{(x_m^2 + y^2)^2} k(\alpha),$$

где  $AF$  – амплитудный фактор магнитного поля стальной трубы,

$$k(\alpha) \approx 1 - \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2}} \quad (13)$$

- геометрический параметр чувствительности градиентометра.

Параметр помехоустойчивости для данной схемы измерения градиента напряженности магнитного поля равен:

$$\gamma(\alpha) \approx \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2}} \right]. \quad (14)$$

Зависимости комплексных параметров чувствительности и помехоустойчивости градиентометра от параметра  $\alpha$ , определенные по формулам (13) – (14), показаны на рис. 8в).

Из рис. 8 и соответствующих расчетных формул видно, что параметры чувствительности и помехоустойчивости рассмотренных схем измерения градиента напряженности магнитного поля стального трубопровода являются противоборствующими: повышение показателей одного из этих параметров неизбежно приводит к снижению показателей другого параметра.

Из приведенных на рис. 8 зависимостей следует, что с точки зрения обеспечения наилучшей чувствительности и помехоустойчивости

магнитометрических измерений, оптимальными являются схемы по рис. 7а, б, в измерения градиента напряженности магнитного поля ТП.

Эти схемы измерения имеют наилучшие показатели чувствительности и помехоустойчивости градиентометра при приемлемых для практики контроля величинах геометрического параметра  $\alpha$  измерительного блока.

Например, при изменении глубины залегания стальной трубы  $y_3$  от 1 м до 3 м, при значении геометрического параметра  $\alpha=0,4$ , величина базы градиентометрической схемы измерительной системы меняется от 0,4 м до 1,2 м, что является приемлемым для практики контроля.

При этом значении параметра  $\alpha$ :

- для схемы измерения по рис. 7а геометрический параметр чувствительности равен  $k = 0,553$ , параметр помехоустойчивости  $\gamma = 1,12$ ;

- для схемы измерения по рисунку 7б геометрический параметр чувствительности

равен  $k = 0,514$ , параметр помехоустойчивости  $\gamma = 1,04$ .

Величину базы схемы измерения градиента напряженности магнитного поля над стальным трубопроводом рекомендуется выбирать, ориентируясь на возможную наибольшую глубину залегания стальной трубы, так как из-за малости амплитуды напряженности магнитного поля в пространстве (рис. 3) в данном случае требуется обеспечение наибольшей чувствительности магнитометрических измерений.

При малой глубине залегания стальной трубы, несмотря на нарушение условия оптимальности параметров, приемлемый уровень чувствительности и помехозащищенности схемы измерения будет обеспечиваться за счет того, что амплитуда напряженности магнитного поля над стальной трубой будет иметь сравнительно большие значения.

## Выводы

1. Получены аналитические выражения для расчета комплексных показателей чувствительности и помехоустойчивости магнитометрической системы измерения параметров магнитного поля над подземным стальным трубопроводом.

2. Установлено, что наилучшие показатели чувствительности и помехоустойчивости магнитометрических измерений обеспечиваются схемами измерения, в которых месторасположение преобразователей магнитного поля совпадает с месторасположением экстремумов пространственных составляющих напряженности магнитного поля над стальным трубопроводом.

3. Получены оптимальные для практики магнитометрического контроля стальных трубопроводов значения показателей чувствительности,

помехоустойчивости и величины базы градиентометрических схем измерения параметров магнитного поля.

*Автор выражает глубокую благодарность за внимание, полезные советы и помощь при выполнении работы доктору технических наук, проф. УГАТУ Р.В. Загидулину.*

### Литература

1. Кулеев В.Г., Дубов А.А., Лопатин В.В. Поле рассеяния от дефектной области при намагничивании ферромагнитных труб поперечным магнитным полем. //Контроль. Диагностика, 2002. № 12. С. 45 – 51.
2. Кулеев В.Г., Лопатин В.В. Механизм связи параметра контроля в методе магнитной памяти металла с упругими изгибающими напряжениями в стальных трубах. // Контроль. Диагностика, 2005. № 2. С. 56 – 63.
3. Кулеев В.Г., Атангулова Л.В., Лопатин В.В. Экспериментальное изучение полей рассеяния упруго- и пластически изогнутых труб в поле Земли. //Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 48-61.
4. Konnov V.I., Kuts I.A. Instrumental Complex “M1” for Contactless Diagnostics of Gas Pipelines//10th European Conference on Non-Destructive Testing: Reports - Moscow, 7-11 June 2010. Report № 1.11.8. M.: Publishing house Spektr, 2010. [CD].
5. Коннов В.В. Патент на полезную модель № 88453 РФ. Приборный комплекс для бесконтактной диагностики технического состояния подземных трубопроводов М-1. Заявлено 30.07.2009.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Гардарики, 2003. 317 с.
7. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции М.: Наука, 1974. 432 с.
8. Реутов Ю.Я., Литвиненко А.А. Об эффективности борьбы с помехами путем градиентометрического соединения магниточувствительных элементов // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 76-82.

**SOME MATTERS OF OPTIMIZATION OF MAGNETOMETRIC TESTING  
METHOD FOR STRESS-STRAINED STATE OF UNDERGROUND STEEL  
PIPELINE**

V. V. Konnov

*CJSC Scientific Production Center "MOLNIYA", Moscow  
e-mail: molkon@bk.ru*

**Abstract.** *The analytical expressions for calculating the complex sensitivity and noise immunity magnetometric method contactless control VAT metal underground steel pipeline. The variants of schemes for measuring the magnetic field line. To ensure high sensitivity and noise immunity magnetometer measurements recommended measurement scheme with the location of the magnetic field transducers of extremes spatial components of the magnetic field.*

**Keywords:** *optimization, magnetometric method, pipeline, control of VAT, magnetic sensor, the magnetic field.*

**References**

1. Kuleev VG, Dubov AA Lopatin VV Stray field of the defect area in the magnetization of the ferromagnetic pipe transverse magnetic field. // Control. Diagnosis, 2002. Number 12. Pp. 45 - 51.
2. Kuleev VG, VV Lopatin Communication mechanism monitoring parameter in a method of metal magnetic memory with the elastic bending stress in steel pipes. // Control. Diagnosis, 2005. Number 2. Pp. 56 - 63.
3. Kuleev VG Atangulova LV, VV Lopatin Experimental study of the stray fields of elastically and plastically bent tubes in the field of the Earth. // Flaw. 2002. Number 10. Pp. 48-61.
4. Konnov VI.VI., Kuts IA Instrumental Complex "M1" for Contactless Diagnostics of Gas Pipelines // 10th European Conference on Non-Destructive Testing: Reports - Moscow, 7-11 June 2010. Report № 1.11.8. M.: Publishing house Spektr, 2010. [CD].
5. VV Konnov Patent for useful model № 88453 RF. An instrument system for contactless diagnostics of technical condition of underground pipes M-1. Stated 30.07.2009.

6. Bessonov LA Theory of Electrical Engineering. Electromagnetic field. M. Gardariki, 2003. 317.

7. Arsenin VY Methods of mathematical physics, and special functions, Nauka, 1974. 432 p.

8. Reutov YY, Litvinenko AA The effectiveness of noise control by gradientometricheskogo connect magnetically elements // Flaw. 1989. Number 3. Pp. 76-82.