

УДК 551.46.077.629.584

# ХОДОВЫЕ ПОМЕХИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО ПОИСКА

Е.А. Ивлиев

Санкт-Петербургский  
государственный морской  
технический университет<sup>1</sup>

## ВВЕДЕНИЕ

В современных подводных исследованиях широко применяются подводные аппараты (ПА), содержащие электромагнитные средства обнаружения [1,2]. Электромагнитные средства обнаружения разделяются на пассивные и активные. Пассивные средства используются для измерения собственных электромагнитных полей (ЭМП) объектов поиска, а активные содержат излучающие антенны для создания первичных ЭМП, которые искажаются объектами поиска, и эти искажения регистрируются приемными антеннами. Приемно-излучающая система может содержать антенны магнитного или электрического типов, установленные внутри или снаружи подводного аппарата. Конструктивно излучающая система магнитного типа представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником или без него (петлевые антенны). Излучающая система электрического типа выполняется в виде электрического диполя и конструктивно состоит из двух разнесенных электродов и соединительного кабеля. Приемная система может содержать измерительные датчики для регистрации компонент или модуля индукции магнитного или напряженности электрического поля. Достаточно широко применяется дифференциальное

включение датчиков электромагнитного поля, что позволяет устранить крупномасштабные помехи (например, магнитное поле Земли и его вариации или электрические поля течений).

При движении буксируемых или самоходных подводных аппаратов возникают различные колебания ПА, обусловленные несколькими причинами.

Основные источники колебаний буксируемых искателей:

- качка судна-буксировщика, приводящая к сложным колебаниям кабель-буксира и ПА;
- вибрация кабель-буксира, возникающая даже при отсутствии качки буксировщика, из-за срыва вихрей с плохо обтекаемого кабель-буксира;

Колебания самоходных ПА обусловлены:

- вибрацией корпуса от винтомоторной системы ПА;
- несовершенством системы автоматического управления ПА по глубине и курсу.

Указанные виды колебаний ПА приводят к появлению помех в измерительных каналах параметров ЭМП, которые принято называть *ходовой помехой*.

Ходовые помехи, обусловленные колебаниями ПА, разделим на два основных класса: ходовые помехи, связанные с перемещением и колебаниями базы между измерительными датчиками в магнитном поле Земли; ходовые поме-

хи, связанные с колебаниями приемно-излучающей электромагнитной системы искателей относительно границы раздела вода-грунт.

При использовании дифференциального включения двух датчиков магнитного или электрического типов они образуют базу, ориентированную в каком-либо направлении  $L$ . Причем, если размеры самих датчиков составляют, как правило, несколько сантиметров, база между датчиками может достигать единиц метров. При движении (со скоростью  $V_A$ ) или колебании измерительной системы (с частотой  $\omega$ ), состоящей из двух измерительных датчиков  $D_1$  и  $D_2$  в магнитном поле Земли  $B$ , возникает ЭДС помеха, которая пропорциональна величине магнитного поля Земли ( $B$ ), скорости перемещения ( $V_A$ ) или угловой частоте колебаний ( $\omega$ ) (рис.1). Поскольку экранирования от явлений электромагнитной индукции нет, то даже при расположении проводников базы между датчиками внутри ферромагнитного корпуса ПА помехи данного класса будут точно такими же, как и у непроводящего корпуса ПА.

Электромагнитные системы подводного поиска работают, как правило, в непосредственной близости от донного грунта, электромагнитные параметры которого отличаются от параметров воды. В силу отражения электромагнитного поля при колебаниях ПА возникают помехи, обусловленные влиянием донного грунта. Появление помех от грунта иллюстрируется на рис. 2. Электромагнитный искатель состоит из излучающей (генераторной) антенны и приемной антенны магнитного типа. Приемно-излучающая система построена таким образом, что прямой

<sup>1</sup>190008, Санкт-Петербург, ул. Лопманская, 3. Тел. 714-07-61. Факс 713-81-09. E-mail: office@smtu.ru

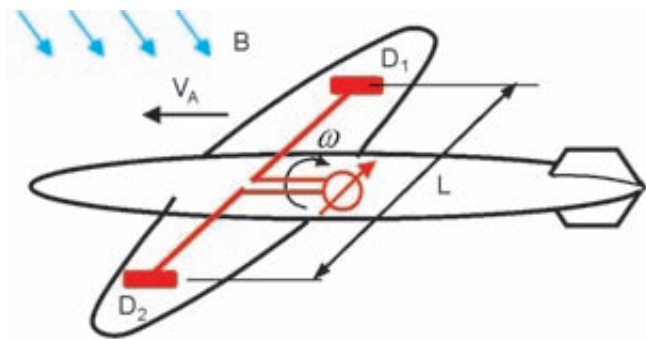


Рис. 1. Перемещение и колебания дифференциального приемника ЭМП в присутствии магнитного поля Земли



Рис. 2. Возникновение помехи от грунта в активном электромагнитном искателе

сигнал излучающей антенны скомпенсирован в приемной антенне геометрически за счет ортогонального расположения осей антенн. Влияние границы раздела вода–грунт в первом приближении можно учесть зеркально отраженным источником ЭМП. Как видно, такой источник будет создавать в приемной антенне помехонесущее ЭМП как при колебаниях ПА, так и при изменении расстояния от грунта.

**Ходовые помехи, обусловленные перемещением и колебаниями базы между датчиками в магнитном поле Земли.**

Алгоритм расчета помех, обусловленных колебаниями базы между датчиками, рассмотрим на примере измерения параметров электрической компоненты ЭМП с помощью контактных электродных датчиков.

При построении алгоритма расчета помех приняты следующие основные положения:

- параметры магнитного поля Земли известны;

- скорость точек поверхности корпуса, в которых расположены электроды, представляется в виде суперпозиции поступательного движения точек с полюсом (центр тяжести ПА или центр водоизмещения) и вра-

щательного движения точек вокруг полюса;

- расположение измерительных электродов относительно полюса существенно влияет на помехи, связанные с колебаниями (формулы содержат радиус-векторы точек расположения электродов).

Методику определения помех, обусловленных колебаниями базы между датчиками в магнитном поле Земли, рассмотрим на примере расчетной модели, показанной на рис. 3, где для измерения трех компонент электрической составляющей ЭМП используются 5 контактных электродов, которые образуют три ортогональных измерительных базы вдоль осей  $x', y', z'$ .

В центре тяжести ПА (полюсе) вводится локальная система координат  $x', y', z'$ , связанная с ПА. Измерительная система состоит из 5 контактных электродов, расположенных на диэлектрическом корпусе, которые образуют три канала для измерения напряженности электрического поля, которые определяются через значения

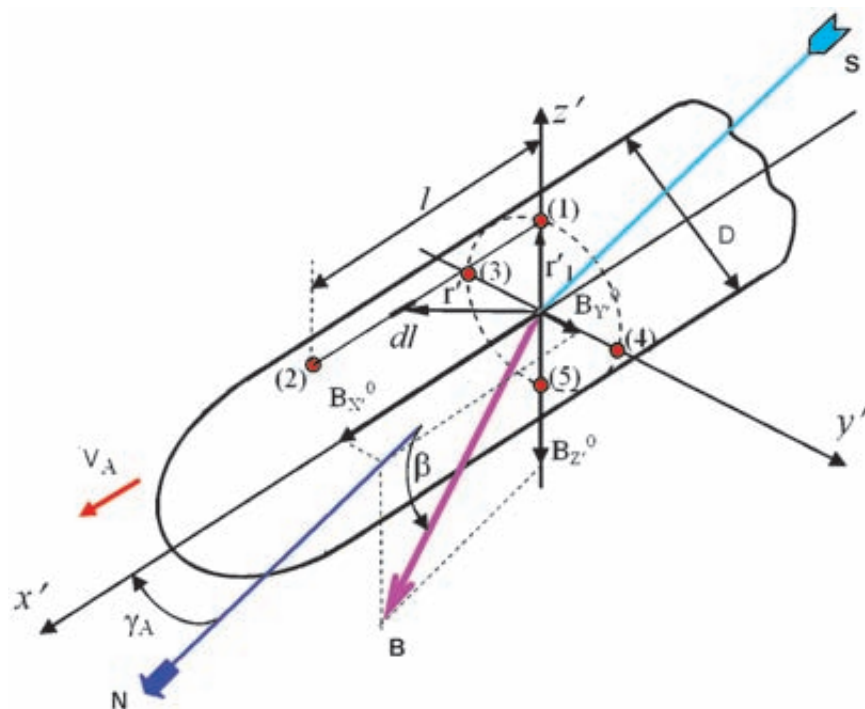


Рис. 3. Расчетная модель электродной измерительной системы

потенциала на электродах по формулам:

$$E_{X'} \approx K_{X'} \frac{U_{(2)} - U_{(1)}}{l},$$

$$E_{Y'} \approx K_{Y'} \frac{U_{(4)} - U_{(3)}}{D},$$

$$E_{Z'} \approx K_{Z'} \frac{U_{(1)} - U_{(5)}}{D},$$

где  $K_{X'}, K_{Y'}, K_{Z'}$  – коэффициенты формы по осям  $X', Y', Z'$ , которые характеризуют степень искажения корпусом ПА однородного электрического поля. Например, если контактные измерительные электроды расположены на поверхности диэлектрического цилиндра и можно пренебречь влиянием его оснований, то коэффициенты формы равны  $K_{X'} = 1, K_{Y'} = K_{Z'} = 2$  [3].

Алгоритм расчета индуцированных шумов состоит из следующих шагов.

1. Задаются исходные данные:

- модуль вектора индукции магнитного поля Земли  $|\mathbf{B}|$ ;
- угол магнитного наклона  $\beta$ ;
- магнитный курс ПА  $\gamma_A$ ;
- скорость ПА  $V_A$ ;
- амплитудные значения углов крена ( $\varphi_{\max}$ ), дифферента ( $\theta_{\max}$ ) и рыскания ( $\psi_{\max}$ );
- периоды колебаний по крену ( $T_\varphi$ ), дифференту ( $T_\theta$ ) и рысканию ( $T_\psi$ );
- координаты электродов в связанной с корпусом ПА системе координат  $x', y', z'$  –  $\mathbf{r}'_k(x'_k, y'_k, z'_k) \quad k = \overline{1, m}$ , где  $m$  – количество электродов на поверхности ПА;
- $l, D$  – продольная и поперечная базы измерительной системы;

2. Определяются проекции вектора магнитной индукции Земли  $\mathbf{B}$  на оси, связанной с ПА системы координат  $x', y', z'$  –  $\mathbf{B}^0$  (при отсутствии колебаний):

$$B_{X'}^0 = |\mathbf{B}| \cos \beta \cos \gamma_A,$$

$$B_{Y'}^0 = |\mathbf{B}| \cos \beta \sin \gamma_A,$$

$$B_{Z'}^0 = -|\mathbf{B}| \sin \beta,$$

где знаки составляющих магнитного поля Земли соответствуют северному полушарию.

3. Угловые колебания ПА при движении для произвольного момента времени задаются выражениями:

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_\varphi} t + \varphi_0\right), \quad (1)$$

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_\theta} t + \theta_0\right), \quad (2)$$

$$\psi(t) = \psi_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_\psi} t + \psi_0\right). \quad (3)$$

4. Для любого момента времени  $t$  вычисляются компоненты вектора индукции магнитного поля Земли в связанной с ПА системе координат  $x', y', z'$  (последовательность поворотов: угол  $\psi$ , угол  $\theta$ , угол  $\varphi$ ) (рис. 4):

$$\begin{pmatrix} B_{X'}(t) \\ B_{Y'}(t) \\ B_{Z'}(t) \end{pmatrix} = S_{X'} S_{Y'} S_{Z'} \begin{pmatrix} B_{X'}^0(t) \\ B_{Y'}^0(t) \\ B_{Z'}^0(t) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $S_{X'}, S_{Y'}, S_{Z'}$  – матрицы преобразования компонент вектора  $\mathbf{B}^0$  в связанную с ПА систему координат  $x', y', z'$  при наличии только угловых колебаний по крену, дифференту и углу рыскания соответственно.

Матрицы преобразований определяются выбором системы координат и порядком пово-

ротов по углам  $\psi, \theta, \varphi$ , вид которых можно найти, например, в [4].

5. Для любого момента времени  $t$  и любой точки с координатами  $r'_p(x'_p, y'_p, z'_p)$  вычисляются скорости движения относительно воды:

$$\mathbf{V}(r'_p, t) = \mathbf{V}_A \cdot \mathbf{e}_{X'} + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{r}'_p, \quad (5)$$

где  $\boldsymbol{\omega}(t) = \omega_{X'}(t) \mathbf{e}_{X'} + \omega_{Y'}(t) \mathbf{e}_{Y'} + \omega_{Z'}(t) \mathbf{e}_{Z'}$  – вектор угловой скорости вращения точки с координатами  $r'_p(x'_p, y'_p, z'_p)$  относительно полюса,  $\mathbf{e}_{X'}, \mathbf{e}_{Y'}, \mathbf{e}_{Z'}$  – единичные орты системы координат  $x', y', z'$ .

Координатное представление формулы (3) имеет вид:

$$V_{X'} = V_A + (\omega_{Y'} z'_p - \omega_{Z'} y'_p),$$

$$V_{Y'} = (\omega_{Z'} x'_p - \omega_{X'} z'_p),$$

$$V_{Z'} = (\omega_{X'} y'_p - \omega_{Y'} x'_p).$$

Значения компонент угловой скорости вращения в момент времени  $t$  определяются по формулам:

$$\omega_{X'} = \dot{\varphi}(t) - \dot{\psi}(t) \sin \theta(t),$$

$$\omega_{Y'} = \dot{\theta}(t) + \dot{\psi}(t) \cos \theta(t) \sin \varphi(t),$$

$$\omega_{Z'} = \dot{\psi}(t) \cos \theta(t) \sin \varphi(t) - \dot{\theta}(t) \sin \varphi(t), \quad (6)$$

где  $\varphi(t), \psi(t), \theta(t)$  определяются по формулам (1), а производные по времени по формулам:

$$\dot{\varphi}(t) = \varphi_{\max} \frac{2\pi}{T_\varphi} \cos\left(\frac{2\pi}{T_\varphi} t + \varphi_0\right),$$

$$\dot{\theta}(t) = \theta_{\max} \frac{2\pi}{T_\theta} \cos\left(\frac{2\pi}{T_\theta} t + \theta_0\right),$$

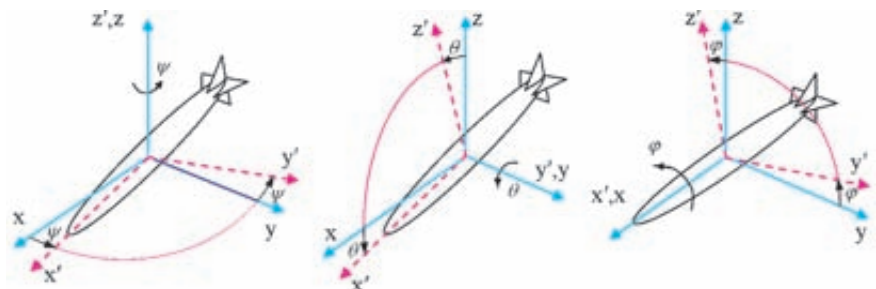


Рис. 4. Колебания ПА по углам рыскания ( $\psi$ ), дифферента ( $\theta$ ) и крена ( $\varphi$ )



$$\psi(t) = \psi_{\max} \frac{2\pi}{T_\psi} \cos\left(\frac{2\pi}{T_\psi} t + \psi_0\right).$$

Для малых угловых колебаний формулы (6) могут быть записаны в виде:

$$\omega_{x'} = \dot{\phi}, \quad \omega_{y'} = \dot{\theta}, \quad \omega_{z'} = \dot{\psi}.$$

6. Для любого момента времени  $t$  и двух электродов с координатами  $r'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$  и  $r'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$  вычисляется ЭДС по формуле:

$$e(t) = \int_1^2 [(\mathbf{V}_A \mathbf{e}_{x'} + \omega \times \mathbf{r}') \times \mathbf{B}] \cdot d\mathbf{l}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{B}$  – вектор индукции магнитного поля Земли в районе, где движется ПА,  $\mathbf{r}'$  – вектор, направленный из полюса к элементу  $d\mathbf{l}$ .

В формуле (7) можно разделить ЭДС на члены, зависящие от текущих углов  $\phi(t), \psi(t), \theta(t)$ , и члены, зависящие от угловых скоростей:

$$e(t) = e(t)|_{\omega=0} + e(t)|_{\omega \neq 0}.$$

Первые члены ЭДС равны:

- для базы по оси  $0x'$   
 $e_{x'}|_{\omega=0} = 0$ ;
- для базы по оси  $0y'$   
 $e_{y'}|_{\omega=0} = V_A B_z D$ ;
- для базы по оси  $0z'$   
 $e_{z'}|_{\omega=0} = V_A B_y D$ .

Выражение для членов ЭДС, зависящих от угловой скорости, в векторной форме, имеет вид:

$$e|_{\omega \neq 0} = l_b \left[ \left[ \dot{\mathbf{u}} \times \left( \mathbf{r}'_1 + \frac{l_b}{2} \mathbf{e}_l \right) \right] \times \mathbf{B}' \right] \cdot \mathbf{e}_l, \quad (8)$$

где  $l_b$  – длина базы,  $\mathbf{e}_l$  – орт по направлению базы,  $\mathbf{r}'_1$  – радиус-вектор положения 1-го электрода базы (рис. 3).

Для выбранной системы измерительных электродов, показанной на рис. 3, последние выражения (8) в компонентной форме принимают вид:

- для базы по оси  $0x'$   
( $y' = 0, z' = D/2$ )  
 $e|_{\omega \neq 0} = \left[ \omega_{y'} B_{y'} + \omega_{z'} B_{z'} \right] \frac{l}{2} - B_{z'} \omega_{x'} \frac{Dl}{2}$ ;
- для базы по оси  $0y'$   
( $x' = 0, z' = 0$ )  $e|_{\omega \neq 0} = 0$ ;
- для базы по оси  $0z'$   
( $x' = 0, y' = 0$ )  $e|_{\omega \neq 0} = 0$ .

Приведенные выражения для ЭДС помех, индуцированных при перемещении и колебаниях баз между датчиками в магнитном поле Земли, позволяют выполнить качественный и количественный анализ характеристик помех. Кроме этого, полученные соотношения никак не связаны с типом первичных преобразователей (датчиков), установленных на концах измерительных баз.

Сводка формул для расчета различных помех дана в таблицах 1, 2.

**Примеры расчета помех, обусловленных перемещением и колебаниями базы между датчиками в магнитном поле Земли.**

Расчет помех выполним для расчетной модели, показанной на рис. 3. Результаты расчета помех приведены на рисунках 5-9 при следующих параметрах:

- модуль напряженности магнитного поля Земли  $F=45$  А/м;
- угол магнитного наклонения  $\beta=60^\circ$ ;
- магнитный курс ПА  $\gamma_A = -45^\circ$  (кроме рис.7 и рис.9);
- длины электродных баз по осям связанной системы координат ( $x', y', z'$ ) равны соответственно 1м, 0,5м и 0,5м (после учета коэффициентов формы эффективная длина всех трех баз будет равна 1м);
- скорость ПА  $V_A=4$ м/с.

Остальные параметры указаны в подрисуночных подписях.

Анализ зависимостей на рисунках 5-9 позволяет сделать следующие выводы:

- на поперечной ( $0y'$ ) и вертикальной ( $0z'$ ) базах ( $e_{y'}$  и  $e_{z'}$ ) индуцируются помехи, постоянная составляющая которых равна десяткам мкВ, на продольной базе ( $0x'$ ) эта помеха равна нулю (рис. 5-7).
- помехи  $e_{y'}$  и  $e_{z'}$  модулированы по амплитуде вследствие изменения ориентации баз

Таблица 1. Формулы для ЭДС при  $\omega=0$

Ориентация базы	Формула для ЭДС
	$e = 0$
	$e = B_z V_A D$
	$e = B_y V_A D$

Таблица 2. Формулы для ЭДС при  $\omega \neq 0$ 

Вид колебания базы	Формула для ЭДС
	$e = -\omega_{x'} B_{z'} \frac{lD}{2}$
	$e = -\omega_{y'} B_{x'} dD$
	$e = -\omega_{z'} B_{x'} dD$
	$e = -\omega_{z'} B_{z'} \frac{l^2}{2}$
	$e = -\omega_{y'} B_{y'} \frac{l^2}{2}$

относительно вектора индукции магнитного поля Земли, амплитуда модуляции достигает 10-20 мкВ (рис.5-7);

- помехи, пропорциональные угловым скоростям, наводятся только на продольной базе ( $0x'$ ) (рис. 8-9);

- изменение курса ПА влияет на величину и знак постоянной помехи на вертикальной базе, но практически не изменяет амплитуды модуляции (сравните рис. 5 и рис. 7).

Анализ полученных соотношений и данные численного моделирования помех позволяют сделать следующие обобщения.

1. При движении ПА с постоянной скоростью без колебаний на продольной базе ( $0x'$ ) не индуцируются ЭДС помехи; на поперечной базе ( $0y'$ ) индуцируется постоянная по величине ЭДС помеха, не зависящая от курса ПА; на вертикальной базе ( $0z'$ ) индуцируется постоянная по величине ЭДС помеха, зависящая от магнитного курса ПА.

2. Помехи, возникающие при колебаниях баз между датчиками, можно условно разделить на помехи, возникающие при угловых колебаниях направления измерительных

баз относительно вектора индукции магнитного поля Земли (квазистатические изменения положения с «нулевой» угловой скоростью), и помехи, возникающие при колебаниях баз между датчиками относительно полюса (с конечной угловой скоростью).

3. ЭДС помехи при движении ПА без колебаний и при движении с квазистатическим изменением положения баз между датчиками ( $\omega=0$ ) определяются по одним и тем же формулам (направления скорости баз и компоненты магнитного поля, индуцирующей помеху, – ортогональны).

4. Помехи, возникающие при колебаниях баз между датчиками ( $\omega \neq 0$ ), зависят от расположения базы относительно полюса, размеров базы и угловых скоростей базы относительно осей связанной системы координат;

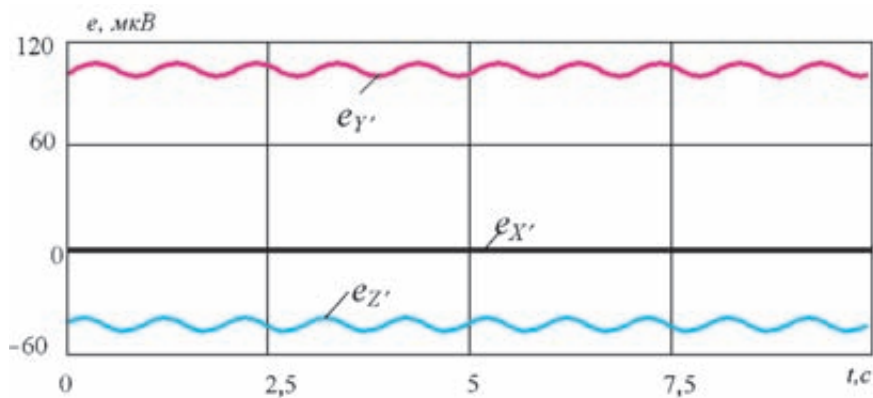
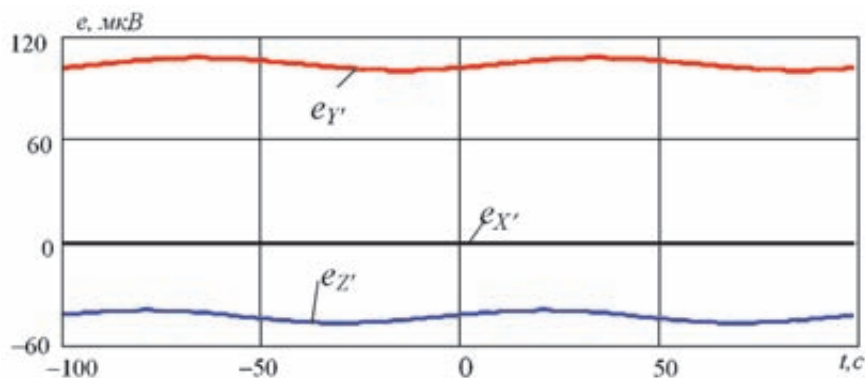
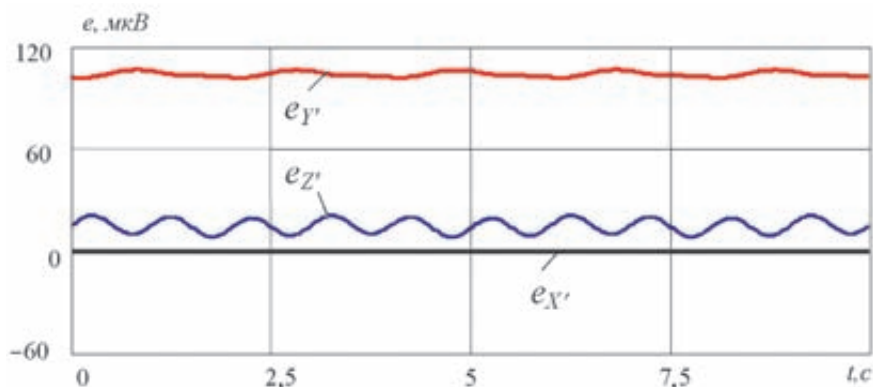
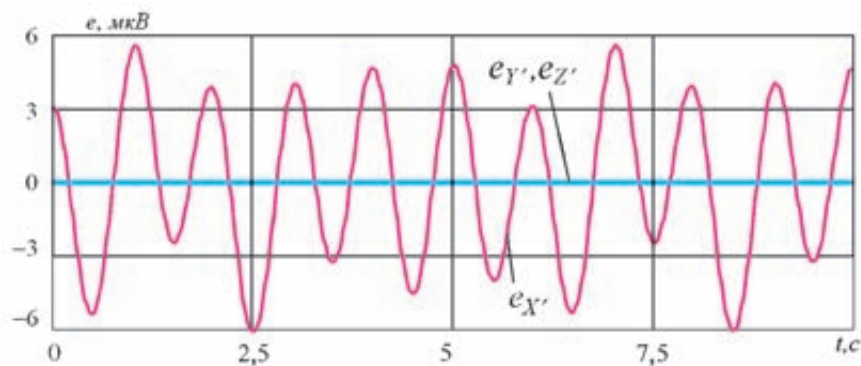
5. Для датчиков, у которых середина базы совпадает с полюсом, помехи от угловых скоростей равны нулю.

6. Пара датчиков, смещенных параллельно с оси колебаний, имеет минимальную помеху, пропорциональную угловой скорости относительно этой оси, если расстояния от датчиков до полюса равны.

7. ЭДС помехи от угловых скоростей уменьшаются пропорционально увеличению периодов колебаний баз между датчиками.

### Ходовые помехи, обусловленные влиянием донного грунта

Помехи, связанные с колебаниями ПА относительно донного грунта, характерны для активных электромагнитных систем подводного поиска. Активные электромагнитные излучатели содержат минимум одну излучающую антенну магнитного или электрического типов

Рис. 5. Уровни помех при  $\omega=0$ ,  $\varphi_{\max}=3^\circ$ ,  $\theta_{\max}=3^\circ$ ,  $\psi_{\max}=3^\circ$ ,  $T_\varphi=1с$ ,  $T_\theta=1с$ ,  $T_\psi=1с$ ,  $\gamma_A=-45^\circ$ Рис. 6. Уровни помех при  $\omega=0$ ,  $\varphi_{\max}=3^\circ$ ,  $\theta_{\max}=3^\circ$ ,  $\psi_{\max}=30^\circ$ ,  $T_\varphi=5с$ ,  $T_\theta=5с$ ,  $T_\psi=5с$ ,  $\gamma_A=-45^\circ$ Рис. 7. Уровни помех при  $\omega=0$ ,  $\varphi_{\max}=3^\circ$ ,  $\theta_{\max}=2^\circ$ ,  $\psi_{\max}=1^\circ$ ,  $T_\varphi=1с$ ,  $T_\theta=2с$ ,  $T_\psi=3с$ ,  $\gamma_A=15^\circ$ Рис. 8. Уровни помех при  $\omega \neq 0$ ,  $\varphi_{\max}=3^\circ$ ,  $\theta_{\max}=2^\circ$ ,  $\psi_{\max}=1^\circ$ ,  $T_\varphi=1с$ ,  $T_\theta=2с$ ,  $T_\psi=3с$ ,  $\gamma_A=-45^\circ$ 

и минимум одну приемную антенну магнитного или электрического типов.

Для описания колебаний искателя относительно грунта введем 2 системы декартовых координат, показанных на рис. 10. В общем случае электромагнитные параметры воды и грунта могут отличаться удельными электрическими проводимостями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и относительными магнитными проницаемостями  $\mu_1$  и  $\mu_2$  ( $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{Г/м}$ ).

Система  $x', y', z'$  связана с искателем. Она имеет начало координат в точке  $O'$ , совпадающей с центром тяжести искателя (полюс).

Система  $x, y, z$  связана с грунтом. Она имеет начало координат в какой-либо точке  $O$  на поверхности грунта или вблизи нее. При этом реальное положение искателя в процессе его качки в системе  $x, y, z$  характеризуется углами рыскания  $\psi$ , дифферента  $\theta$  и крена  $\varphi$ .

Значения координат в двух указанных системах связаны следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = S \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix},$$

где  $S = S_{x'} S_{y'} S_{z'}$ , а  $S_{x'} S_{y'} S_{z'}$  – те же, что и в (2).

Реальные (сложные) колебания ПА могут быть разделены на следующие элементарные колебания:

- колебания вокруг оси  $O'x'$ , характеризующиеся углом крена  $\varphi$ ;
- колебания вокруг оси  $O'y'$ , характеризующиеся углом дифферента  $\theta$ ;
- колебания вокруг оси  $O'z'$ , характеризующиеся углом рыскания  $\psi$ ;
- колебания искателя в вертикальной плоскости (по высоте) с амплитудой  $\Delta Z$ ;

Если предположить, что дно является плоским и однородным



по своим электромагнитным параметрам (в пределах зоны действия приемно-излучающей системы ПА), то колебания искателя в горизонтальной плоскости вследствие его рыскания не будут приводить к изменению отраженного сигнала независимо от ориентации излучающей и приемной антенн и поэтому не являются источниками помех.

Поэтому в дальнейшем в качестве источников помех от грунта рассматриваются только крен, дифферент и изменение высоты движения ПА относительно дна.

Выражения для определения углов крена и дифферента соответствуют соотношениям (1) и (2), а для выражения колебаний полюса по высоте имеет вид:

$$\Delta z(t) = d + \Delta z \cdot \sin \frac{2\pi t}{T_d},$$

где  $d$  и  $\Delta z$  – средняя высота движения искателя над грунтом и амплитуда колебаний по высоте;  $T_d$  – период колебаний искателя по высоте.

Некоторые данные натурных измерений углов крена и дифферента для электромагнитного искателя, буксировавшегося со скоростью 7 узлов на глубине 30 м при длине кабель-буксира  $L = 100$  м, показаны на рис. 11. Как видно из представленных зависимостей, указанные колебания близки к гармоническим с периодом колебаний, близким к 5 с, максимальное амплитудное значение для угла крена –  $10^\circ$ , для угла дифферента –  $5^\circ$ .

Анализ имеющихся экспериментальных данных показал, что максимальные значения амплитуды колебаний различных искателей при их буксировке на глубинах 20-50 м составляют: по высоте – 0,3 м, по крену –  $10^\circ$  и дифференту –  $5^\circ$ . Период всех этих колебаний лежит в пределах 3-10 с.

Экспериментальные данные также показывают, что колеба-

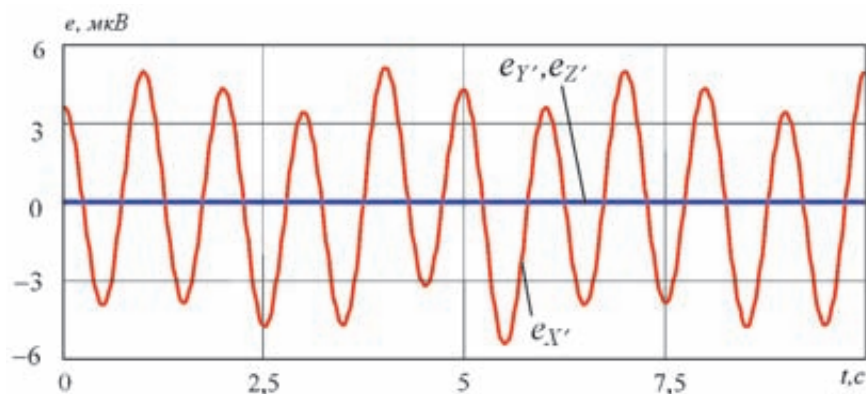


Рис. 9. Уровни помех при  $\omega \neq 0$ ,  $\varphi_{\max} = 3^\circ$ ,  $\theta_{\max} = 2^\circ$ ,  $\psi_{\max} = 1^\circ$ ,  $T_\varphi = 1$  с,  $T_\theta = 2$  с,  $T_\psi = 3$  с,  $\gamma_A = 15^\circ$

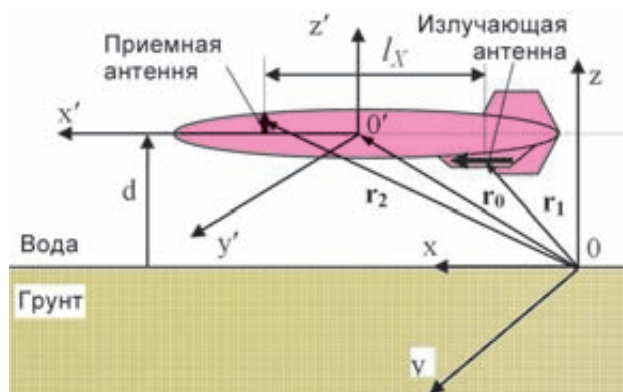


Рис. 10. Системы координат для описания колебаний ПА относительно границы раздела вода-грунт

ния буксируемого искателя затухают с увеличением глубины и длины кабель-буксира.

Алгоритм вычисления ходовых помех, связанных с колебаниями искателя относительно границы раздела вода-грунт, рассмотрим на примере активных электромагнитных искателей, имеющих излучающие и приемные антенны магнитного типа.

Алгоритм основан на последовательном выполнении следующих этапов.

1. По заданным параметрам угловых колебаний ПА определяются компоненты магнитного момента его генераторной антенны в произвольный момент времени (в неподвижной системе координат, связанной с грунтом).

2. По заданной скорости ПА и заданным параметрам угловых и вертикальных колебаний определяются положения

геометрического центра его генераторной и приемной антенн в произвольный момент времени в неподвижной системе координат, связанной с грунтом.

3. Определяются составляющие напряженности переменного магнитного поля, возбуждаемого излучающей антенной в геометрическом центре приемной антенны в произвольный момент времени в неподвижной системе координат, связанной с грунтом, с учетом его электромагнитных параметров.

4. Определяется помеха, действующая на приемную антенну, в результате колебаний искателя.

Ниже последовательно рассматриваются соотношения, необходимые для реализации каждого из указанных этапов.

Составляющие магнитного момента генераторной системы

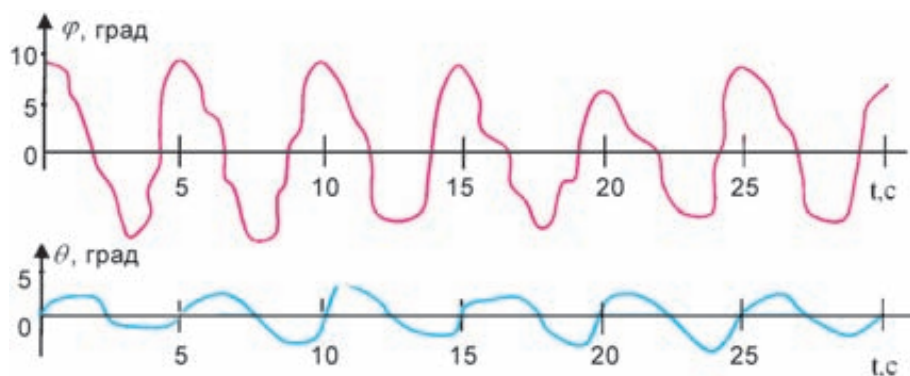


Рис. 11. Фрагмент записи углов крена ( $\varphi$ ) и дифферента ( $\theta$ ) при буксировке электромагнитного искателя

искателя в процессе его угловых колебаний определяются по следующей формуле:

$$\mathbf{M} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{M}'$$

$$\text{где } \mathbf{M} = \begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{Bmatrix} \text{ и } \mathbf{M}' = \begin{Bmatrix} M_{X'} \\ M_{Y'} \\ M_{Z'} \end{Bmatrix}$$

магнитные моменты излучающей антенны ПА в неподвижной, связанной с грунтом, и подвижной, связанной с искателем, системах координат.

Координаты геометрических центров генераторной и приемной антенн ПА при учете условий его колебаний определяются (с учетом обозначений, принятых на рис.10) из соотношений:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \mathbf{r}_0' + \mathbf{S} \cdot \mathbf{r}_1' \\ \mathbf{r}_2 &= \mathbf{r}_0 + \mathbf{S} \cdot \mathbf{r}_2' \end{aligned}$$

где  $\mathbf{r}_1', \mathbf{r}_2'$  – радиус-векторы генераторной и приемной антенн в системе  $X'Y'Z'$ ;  $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  – радиус-векторы полюса ПА, а также геометрических центров генераторной и приемной антенн в системе  $XYZ$ .

Составляющие напряженности магнитного поля в центре тяжести приемной антенны в неподвижной системе координат  $XYZ$  определяются по формуле:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} \quad (9)$$

$$\text{где } \mathbf{H} = \begin{Bmatrix} H_X \\ H_Y \\ H_Z \end{Bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{Bmatrix} h_x^x & h_x^y & h_x^z \\ h_y^x & h_y^y & h_y^z \\ h_z^x & h_z^y & h_z^z \end{Bmatrix}$$

– матрица коэффициентов, учитывающая электромагнитные параметры воды и донного грунта и расположение генераторной и приемной антенн. При этом нижний индекс у коэффициента  $h$  относится к ориентации приемной антенны, а верхний – к ориентации генераторной антенны.

Коэффициенты  $h_i^j (i, j = x, y, z)$  соответствуют значениям напряженности магнитного поля от генераторной антенны с магнитным моментом, равным  $1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$  в геометрическом центре приемной антенны. Необходимые соотношения приводятся в многочисленной литературе по электроразведке и геофизике (см., например, [5, 6]).

Помеха, действующая на приемную антенну, определяется следующим выражением:

$$\mathbf{H}' = \mathbf{A}^T \mathbf{H}$$

$$\text{где } \mathbf{H}' = \begin{Bmatrix} H_{x'} \\ H_{y'} \\ H_{z'} \end{Bmatrix} \text{ – вектор помехи,}$$

$$\mathbf{H} = \begin{Bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{Bmatrix}, \mathbf{A}^T \text{ – матрица, транспонированная к матрице } \mathbf{A}.$$

Для сравнительной оценки уровня помех искателей с различным расположением генераторных и приемных антенн в ходе настоящей работы был выполнен качественный анализ помех, обусловленных различными типами колебаний искателя. С этой целью было использовано выражение:

$$\mathbf{H}' = \mathbf{A}' \mathbf{M}'$$

где  $\mathbf{A}' = \mathbf{S}^T \mathbf{A} \mathbf{S}$ , а матрица  $\mathbf{A}$  та же, что и в формуле (9).

При малых значениях параметров колебаний после перемножения матриц для определения  $\mathbf{A}'$  величины второго порядка малости (содержащие множители  $\varphi^2, \varphi\theta, \theta^2$ ) отбрасывались, а функциональные зависимости от вертикальной координаты  $z$  преобразовывались с использованием формулы Лагранжа.

После этого матрица  $\mathbf{A}'$  представляется в виде:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{F} + \mathbf{B} \cdot \varphi + \mathbf{C} \cdot \theta + \mathbf{D} \cdot \Delta z \quad (10)$$

где  $\mathbf{F}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  – матрицы, характеризующие соответственно помехи, обусловленные: влиянием границы раздела вода–грунт в отсутствие колебаний искателя ( $\mathbf{F}$ ), креном ( $\mathbf{B}$ ) и дифферентом искателя ( $\mathbf{C}$ ), а также его отклонением по глубине ( $\mathbf{D}$ );  $\varphi$  и  $\theta$  – мгновенные значения углов крена и дифферента;  $\Delta z$  – мгновенное значение отклонения ПА по высоте.

В отличие от элементов матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{A}'$  элементы матриц  $\mathbf{F} = \{f_i^j\}$ ,  $\mathbf{B} = \{b_i^j\}$ ,  $\mathbf{C} = \{c_i^j\}$ ,  $\mathbf{D} = \{d_i^j\}$ , входящих в выражение (10), не изменяются при буксировке искателя неизменным курсом, а временные изменения уровней помех определяются изменениями во времени параметров колебаний  $\varphi(t)$ ,  $\theta(t)$  и  $\Delta z(t)$ . Эти параметры колебаний могут быть получены непосредственно из результатов натурных измерений.



Таблица 3. Условия наличия или отсутствия помех для приемно-излучающих систем

Ориентация излучающей и приемной антенн		Ориентация базы и изменяемый параметр				Ориентация базы и изменяемый параметр				Ориентация базы и изменяемый параметр			
И	П	Б	$\varphi$	$\theta$	$\Delta z$	Б	$\varphi$	$\theta$	$\Delta z$	Б	$\varphi$	$\theta$	$\Delta z$
X	X	X	-	+	+	Y	+	-	+	Z	+	+	+
X	Y	X	+	-	-	Y	-	+	-	Z	-	-	-
X	Z	X	-	+	+	Y	-	+	+	Z	-	+	-
Y	X	X	+	-	-	Y	-	+	-	Z	-	-	-
Y	Y	X	-	+	+	Y	+	-	+	Z	+	+	+
Y	Z	X	+	-	-	Y	+	-	-	Z	+	-	-
Z	X	X	-	+	+	Y	-	+	+	Z	-	+	-
Z	Y	X	+	-	-	Y	+	-	-	Z	+	-	-
Z	Z	X	-	+	+	Y	+	-	+	Z	+	+	+

Возможные варианты взаимного расположения излучающей и приемной антенн можно описать с помощью следующих трех моделей приемно-излучающих систем искателей.

Модель 1, для которой генераторная и приемная антенны разнесены вдоль направления буксировки (с базой по оси  $O'X'$ ).

Модель 2, для которой генераторная и приемная антенны разнесены в поперечном направлении (с базой по оси  $O'Y'$ ).

Модель 3, для которой генераторная и приемная антенны разнесены в вертикальном направлении (с базой по оси  $O'Z'$ ).

Если генераторная антенна направлена по декартовой оси  $j$ , а приемная антенна – по декартовой оси  $i$ , то в формуле (10) на месте каждой из матриц будет находиться только один их элемент  $(i^j, b_i^j, c_i^j, d_i^j)$ .

Результаты анализа помех для рассматриваемых трех моделей приемно-излучающих систем сведены в табл. 3, где ПИС – приемно-излучающая система, И – ориентация излучающей антенны, П – ориентация приемной антенны, Б – ориентация базы. При обозначении базы и ориентации излучающей и приемной антенн штрихи опущены, знаком «+» отмечено наличие соответствующего вида помехи, а знаком «-» ее отсутствие (в рамках приближений, при которых получена формула (10)).

Отметим, что влиянием границы раздела вода-грунт в отсутствие колебаний искателя наблюдается тогда, когда имеется помеха, обусловлена колебаниями искателя по высоте.

**Примеры расчета помех, возникающих в активных электромагнитных системах подводного поиска за счет влияния границы раздела вода-грунт**

Рассмотрим приемно-излучающую систему типа ХУХ (излучающая антенна ориентирована вдоль оси X, приемная

антенна ориентирована вдоль оси Y, база между антеннами – вдоль оси X) при следующих параметрах: магнитный момент излучающей антенны  $M_X = 500 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ , удельная электрическая проводимость воды  $\sigma_1 = 4 \text{ См/м}$ , вода и грунт немагнитные  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ , база между антеннами  $L = 1,5 \text{ м}$ , скорость буксировки  $V_A = 4 \text{ м/с}$ , период колебаний по крену  $T_\varphi = 5 \text{ с}$ , амплитуда колебаний по крену  $\varphi_m = 10^\circ$ , остальные параметры варьируются при расчетах и указаны непосредственно на рисунках 12-17.

Поскольку для данной приемно-излучающей системы в соответствии с табл. 3 помеха от грунта обусловлена только изменением угла крена, комплексную амплитуду напряженности магнитного поля помехи найдем по формуле:

$$H = h_Y^X \cdot M_X \cdot \varphi_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_\varphi}t + \varphi_0\right),$$

где согласно [5]  $h_Y^X =$

$$= \frac{x_2 - x_1}{4\pi r} \int_0^\infty \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \lambda^2 J_1(\lambda r) e^{-u_1(z_1 + z_2)} d\lambda,$$

$$\gamma_1 = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma_1}, \quad \gamma_2 = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma_2},$$

$$u_1 = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2}, \quad u_2 = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_2^2},$$

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad x_1, y_1, z_1 -$$

координаты излучающей антенны,  $x_2, y_2, z_2$  – координаты приемной антенны,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота тока в излучающей антенне,  $i$  – мнимая единица.

На рис. 12 показана реальная часть поля помехи в зависимости от частоты генераторной антенны. При этом фазовый сдвиг поля помехи от фазы тока в генераторной антенне (рис. 13) составляет примерно от  $49^\circ$  до  $78^\circ$ .

На рис. 14 показана реальная часть поля помехи в зависимости от отстояния от грунта. При этом фазовый сдвиг поля помехи от фазы тока в генераторной антенне (рис. 15) составляет примерно от  $62^\circ$  до  $81^\circ$ .

На рис. 16 показана реальная часть поля помехи в зависимости от удельной электрической проводимости донного грунта. При этом фазовый сдвиг поля помехи от фазы тока в генераторной антенне (рис. 17) мало зависит от удельной электрической проводимости донного грунта и составляет примерно от  $65^\circ$  до  $70^\circ$ .

Анализ полученных соотношений и данные математического моделирования помех, обусловленных влиянием границы раздела вода-грунт, позволяют сделать следующие обобщения.

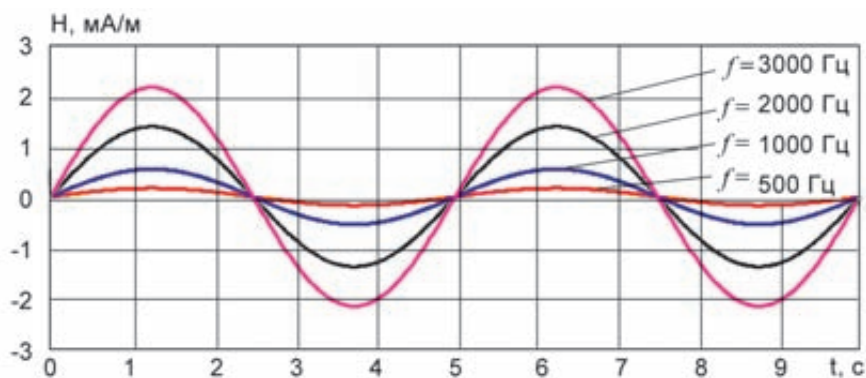


Рис. 12. Влияние частоты генераторной антенны на величину помехонесущего поля при  $\sigma_2 = 1 \text{ См/м}$ ,  $d = 3 \text{ м}$

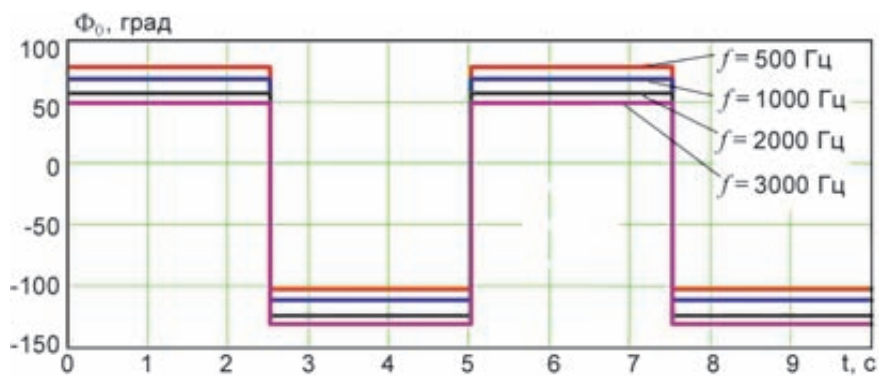


Рис. 13. Влияние частоты генераторной антенны на величину фазового сдвига помехонесущего поля от фазы тока в генераторной антенне при  $\sigma_2 = 1 \text{ См/м}$ ,  $d = 3 \text{ м}$

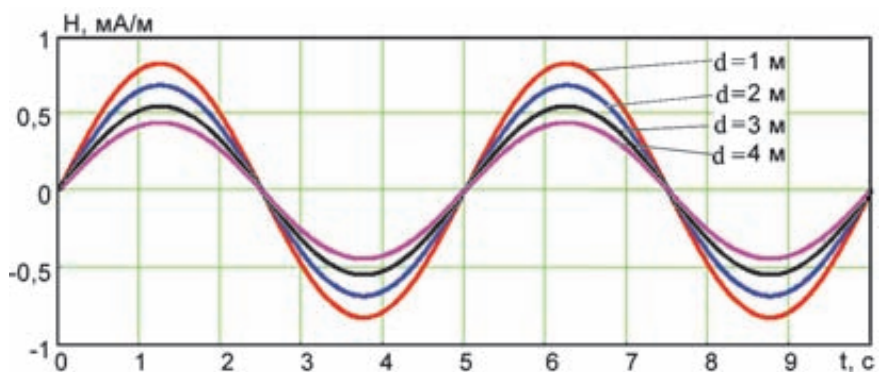


Рис. 14. Влияние отстояния от грунта на величину помехонесущего поля при  $f = 1000 \text{ Гц}$ ,  $\sigma_2 = 1 \text{ См/м}$

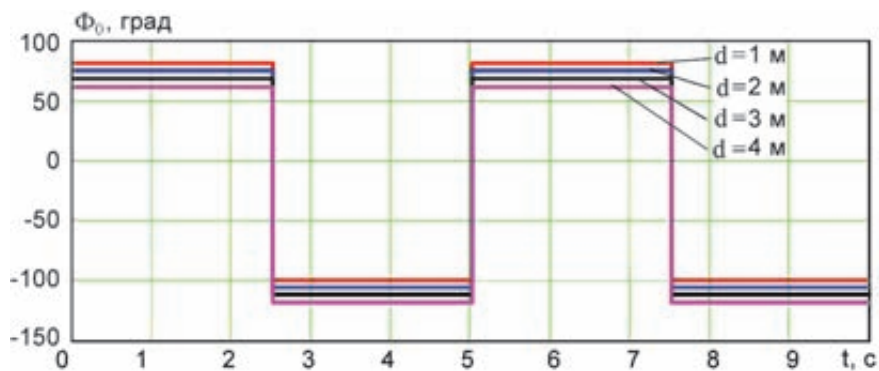


Рис. 15. Влияние отстояния от грунта на величину фазового сдвига помехонесущего поля от фазы тока в генераторной антенне при  $f = 1000 \text{ Гц}$ ,  $\sigma_2 = \text{См/м}$

1. Колебания искателя относительно донного грунта приводят в основном к амплитудной модуляции переменного магнитного поля, воздействующего на приемную антенну. При этом суммарная помеха может быть представлена в следующем виде:

$$H(t) = [H_m + \Delta H_m \cdot x(t)] \cdot \sin(2\pi f t + \Phi_0),$$

где  $H(t)$  – мгновенное значение помехи;  $H_m$  – постоянная составляющая амплитуды помехи;  $\Delta H_m$  – амплитуда модуляции помехи;  $x(t)$  – функция, определяемая характером изменения во времени изгиба и дифферента искателя, а также его отстояния от грунта;  $f$  – частота тока в излучающей антенне;  $\Phi_0$  – разность фаз между током в излучающей антенне и напряженностью магнитного поля помехи на приемной антенне.

2. Уровни помех возрастают с увеличением разности в электропроводностях воды и грунта, а также с ростом частоты тока в излучающей антенне и уменьшением отстояния от дна.

3. При изменении удельной электрической проводимости донного грунта в сотни раз фазовый сдвиг поля помехи от тока в излучающей антенне изменяется на величину не более  $5^\circ$ .

4. Из проведенного анализа различно ориентированных приемно-излучающих систем (табл. 3) следует, что наиболее помехозащищенными являются взаимно-ортогональные антенны с продольной или вертикальной базой, параллельные поверхности дна.

5. Если излучающая и/или приемная антенны электрического типа, то для вычисления коэффициентов матриц, входящих в формулу (10), необходимо использовать соответствующие выражения для ЭМП электрического диполя.

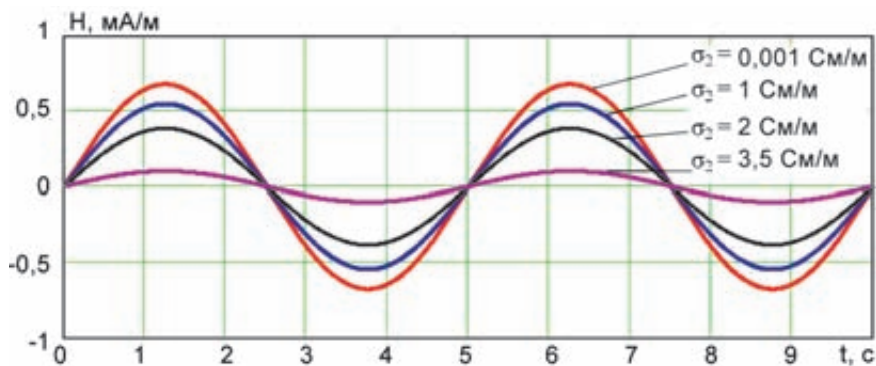


Рис. 16. Влияние удельной электрической проводимости грунта на величину помехоносущего поля при  $f=1000$  Гц,  $d=3$  м

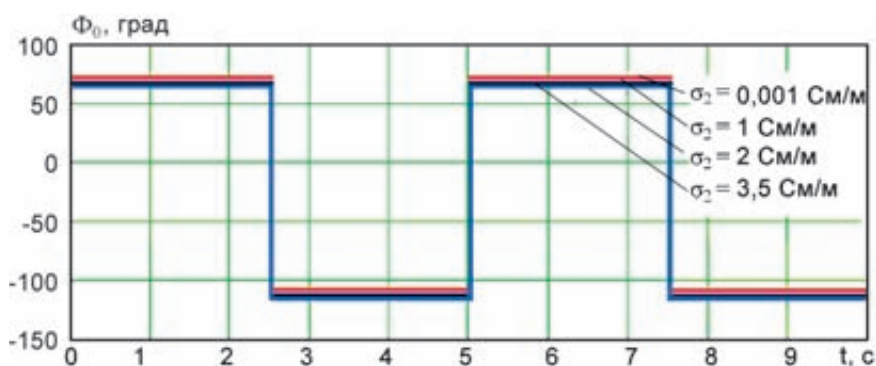


Рис. 17. Влияние частоты генераторной антенны на величину фазового сдвига помехоносущего поля от фазы тока в генераторной антенне при  $f = 1000$  Гц,  $d=3$  м

## ВЫВОДЫ

1. Получены общие соотношения для моделирования помех, обусловленных колебаниями базы между измерительными датчиками, и помех, обусловленных влиянием донного грунта.

2. Для борьбы с помехами, обусловленными колебаниями баз между измерительными датчиками, может использоваться адаптивная компенсация по показаниям лазерных гироскопов, практическая точность которых составляет доли минут.

3. Для компенсации помех от донного грунта наиболее целесообразно использовать фазовую селекцию, поскольку частота генераторной антенны и отстояние от грунта априори известны, а удельной электрической проводимостью грунта можно пренебречь.

4. Методы расчета помех, обусловленных влиянием границы раздела вода-грунт, полностью применимы для расчета помех в активных электромагнитных системах движущихся у границы раздела вода-воздух (при  $\sigma_2 = 0$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др. Океанология: средства и методы океанографических исследований / Междунар. ассоц. акад. наук; РАН; Нац. Акад. Наук Украины. М.: Наука, 2005. 795 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общ. ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
4. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1976. 824 с.
5. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромagnetизм. М.: Недра, 1987. 235 с.
6. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1965. 480 с.

