

УДК 551.46.077:629.584

# ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГИДРОЛОКАТОРА ПОДВОДНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРИЕМНЫХ СИГНАЛОВ

А.К. Кукарских, А.М. Павин

Институт проблем морских технологий  
ДВО РАН, Владивосток

В статье обсуждается метод расчета приемных сигналов электромагнитного гидролокатора (ЭМГ) при движении вблизи протяженного электропроводного объекта (кабеля или трубопровода). Метод расчета иллюстрируется на примере конкретной конструкции ЭМГ, установленного на автономном необитаемом подводном аппарате (АНПА), при рассмотрении антенной системы в дипольном приближении и использовании прямого метода расчета напряженности электромагнитного поля на поверхности электропроводных объектов в морской воде.

Характер изменения сигналов электромагнитного гидролокатора (ЭМГ) при движении вблизи протяженного электропроводного объекта (ПО) в значительной мере определяется взаимным расположением электродов антенн. Поэтому еще на этапе проектирования конструкции ЭМГ важно учесть это влияние и при этом, по возможности, удовлетворить требования к расположению приемных электродов для обеспечения дифференциального приема [1]. Оценка сигналов применительно к конкретной конструкции позволит также промоделировать различные ситуации при движении подводного аппарата относительно протяженного объекта, что особенно важно при разработке новых конфигураций антенной системы и оптимальных алгоритмов отслеживания ПО с использованием сигналов ЭМГ.

В ранее опубликованных работах [2, 3] приведены конструкция и выражения для

сигналов электромагнитного гидролокатора, установленного на автономном необитаемом подводном аппарате (АНПА) и предназначенного для поиска и отслеживания протяженного объекта. Однако выражения эти пригодны лишь в частном случае, а именно только для моментов прохождения подводного аппарата непосредственно над протяженным объектом. В данной работе уровень сигналов ЭМГ определяется путем расчета наведенного тока и его воздействия на приемные антенны при любом расположении электродов и положении протяженного объекта относительно АНПА. При этом используется прямой метод расчета электромагнитного поля [4] и его приложения [5].

Для проведения расчетов воспользуемся описанием антенной системы в дипольном приближении [5, 6]. Расчеты выполним применительно к конкретной конструкции антенной системы электромагнитно-

го гидролокатора, показанной на рис. 1. Антенная система состоит из электрических дипольных излучателей (ЭДИ) и дифференциальных приемников электрического поля (ДПП).

Предварительно учтем ряд особенностей и ограничений, которых следует придерживаться.

Во-первых, требуется постоянство амплитуды тока по длине  $Le$  дипольного излучателя, что в достаточной мере обеспечивается соблюдением неравенства  $Le \ll \lambda$ , где  $\lambda = 2\sqrt{\pi/(\mu\sigma f)}$  – длина волны электромагнитного поля (ЭМП) в морской воде,  $\mu, \sigma$  – магнитная проницаемость и удельная электропроводность морской воды. При рабочих частотах  $f \leq 4$  кГц это условие выполняется. Поскольку ток ЭДИ реально идет от одного электрода к другому, растекаясь по поверхности корпуса АНПА, в первом приближении можно считать, что максимум

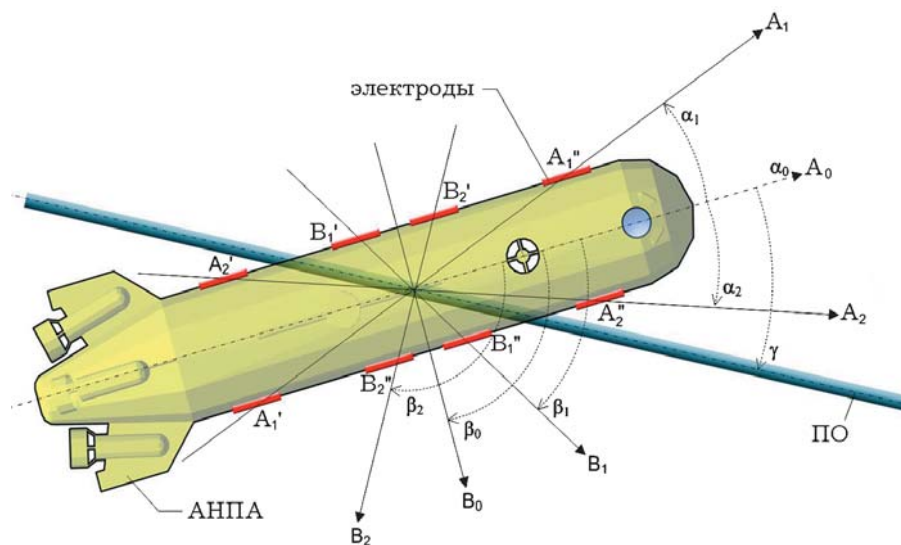


Рис. 1. Антенная система ЭМГ. ЭДИ обозначены буквой А ( $A_1: A_1' \sim A_1''$ ,  $A_2: A_2' \sim A_2''$ ,  $A_0: A_0' \sim A_0''$ ), ДПП – буквой В ( $B_1: B_1' \sim B_1''$ ,  $B_2: B_2' \sim B_2''$ ,  $B_0: B_0' \sim B_0'' + B_0' \sim B_0''$ ). Расположение электродов по бортам АНПА симметричное (относительно продольной вертикальной осевой плоскости АНПА)

тока концентрируется вдоль кратчайшей кривой, а именно по траектории эллипса (ЭДИ  $A_1$  и  $A_2$ ) или прямой ( $A_0$ ), т.е. по линии пересечения поверхности АНПА с вертикальной плоскостью, проходящей через оба электрода ЭДИ.

Вторым условием является соблюдение отношения  $r \gg Le$ , где  $r$  – расстояние от расчетной точки до ЭДИ. Так, для сколь угодно удовлетворительного описания ЭМП реального ЭДИ необходимо [6]  $r > 5 \cdot Le$ . Для соблюдения этого условия в ближней зоне ЭДИ можно разбить (по длине) на несколько дипольных излучателей (ДИ) и расчет электрического поля в точке (в толще воды или на ПО) производить как от их суммарного воздействия. Аналогичным образом определяется и обратное воздействие наведенного в ПО тока на ДПП. То есть активный участок ПО делится на несколько небольших отрезков, каждый длиной  $l_A$ . Активным будем считать участок ПО, части которого находятся на расстоянии (от ЭДИ), не превышающем  $Lw \approx 0,9\lambda$  (на расстоянии от источника, рав-

ном  $\lambda$ , происходит практически полное затухание ЭМП). К этому принуждает также и необходимое условие применимости прямого метода, а именно стационарность электрического поля в рассматриваемой зоне. При небольшой длине отрезка напряженность электрического поля в месте его расположения можно считать приблизительно постоянной, а сам отрезок рассматривать как дипольный излучатель (ДИ). В месте расположения каждого такого отрезка можно определить напряженность поля, возбуждаемого ЭДИ на поверхности ПО, и вычислить (прямым методом) наведенный ток. Суммарное воздействие этих ДИ всего активного участка ПО и определяет уровень изменения напряженности поля в месте расположения ДПП (на АНПА). При определении длины  $l_A$  таких ДИ следует также учесть необходимость соблюдения условия [4]  $l_A \gg R_A$ , где  $R_A$  – радиус ПО. В первом приближении достаточным окажется  $l_A/R_A \geq 20$ .

Таким образом, область применимости предлагаемой мето-

дики расчетов определяется выражениями:  $l_A/R_A \geq 20$  и  $h/l_A \geq 5$ , где  $h$  – высота АНПА над грунтом дна (как минимальное расстояние от ПО до ДПП ЭМГ). Так, например, при радиусе ПО  $R_A = 0,008$  м ( $l_A \geq 0,16$  м) высота  $h$  должна быть не менее 0,8 м.

Для наглядности расчетов на рис. 2 показано взаимное расположение АНПА и ПО (вид сверху). Положение приемных электродов может быть изменено согласно рекомендациям, приведенным в [1, 7]. Антенная система ЭМГ состоит из трех ЭДИ: ЭДИ<sub>0</sub> ( $A_0$  на рис. 1, направление оси диполя – по курсу АНПА), ЭДИ<sub>1</sub> ( $A_1$  на рис. 1, ось отклонена влево от курса), ЭДИ<sub>2</sub> ( $A_2$  на рис. 1, ось отклонена вправо от курса) – и соответствующих им ДПП. Сигнал  $U_0$  формируется двумя ДПП  $B_2' \sim B_1''$  и  $B_1' \sim B_2''$  в виде  $U_0 = (U_{B_2' \sim B_1''} + U_{B_1' \sim B_2''})/2$ . Эти же ДПП служат также для формирования сигнала  $Us_3 = U_{B_2' \sim B_1''} - U_{B_1' \sim B_2''}$  [2].

Для анализа поведения ЭМИ при отслеживании ПО наиболее информативными являются зависимости сигналов от расстояния АНПА до ПО  $r_B$  (в горизонтальной плоскости). Поэтому целью конечных результатов расчетов является получение зависимостей напряжений на электродах ДПП  $U_1(r_B)$ ,  $U_2(r_B)$ ,  $U_0(r_B)$  при заданных конструктивных параметрах ЭМИ, углах отклонения  $\gamma_0$  и высоте  $h$ .

Исходными для расчетов данными, таким образом, являются:

$\gamma_0$  – угол отклонения продольной оси АНПА (и оси ЭДИ<sub>0</sub>) от направления трассы ПО (может изменяться от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ ) при параллельном курсе  $\gamma_0 = 0$  (на рис. 2 – положительный);

$h$  – высота АНПА над грунтом дна (при работе измеряется эхолотом);

$r_B$  – горизонтальная проекция расстояния от АНПА (сере-

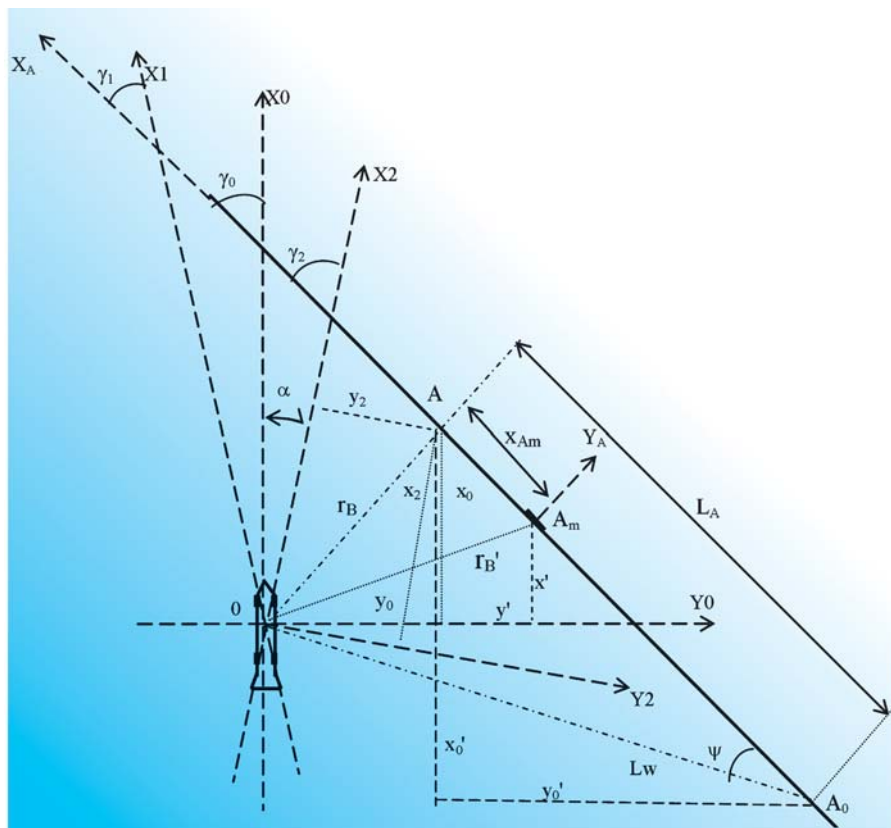


Рис. 2. К расчету возбуждаемого дипольным излучателем (ЭДИ) в ПО электрического поля и напряжения на электродах соответствующего ДПП, наведенного благодаря току, протекающему в ПО. А – точка ПО, ближе всего расположенная к центру осей ЭДИ.  $A_0, A_m$  – отрезки ПО длиной  $l_a$ , рассматриваемые как дипольные излучатели

дины осей ЭДИ до ПО (точка А, см. рис. 2), имеет отрицательное значение при расположении ПО слева (при отрицательной  $y$ -координате точки А) или строго за кормой (при прямом угле оси АНПА к ПО);

$\gamma_1, \gamma_2$  – углы отклонения осей ЭДИ<sub>1</sub> и ЭДИ<sub>2</sub> от направления трассы ПО;

$\alpha$  – значение угла отклонения оси ЭДИ<sub>1,2</sub> в горизонтальной плоскости относительно вертикальной осевой плоскости АНПА;

$\beta$  – значение угла отклонения оси ДПП<sub>1,2</sub> в горизонтальной плоскости относительно вертикальной поперечной плоскости АНПА;

$I_d$  – ток, излучаемый ЭДИ;  
 $L_d = L_{e_0}$  – расстояние между электродами ЭДИ<sub>0</sub> (одного борта);

$R_s$  – радиус корпуса АНПА,  
 $R_A$  – радиус ПО;

$Z_s$  – смещение электродов ЭДИ по вертикали от осевой горизонтальной плоскости АНПА;

$Z_R$  – смещение электродов ДПП по вертикали от осевой горизонтальной плоскости АНПА;

$f$  – рабочая частота ЭДИ.

### Методика расчета сигналов ЭМГ

Поскольку ПО и оси ДПП расположены в горизонтальных плоскостях, вертикальную составляющую наведенного электрического поля можно не учитывать. Каждому ЭДИ соответствует своя система координат. Центры координат для рассматриваемой конструкции (см. рис. 1) совпадают (точка пересечения осей ЭДИ  $A_0, A_1$  и  $A_2$ ). Обозначим координатные

оси, соответствующие ЭДИ<sub>0</sub>, ЭДИ<sub>1</sub>, ЭДИ<sub>2</sub>, как  $(X_0, Y_0)$ ,  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$  (см. рис. 2). Ось  $Z$ , единая для этих координатных систем, направлена вниз. Ближайшую к центрам ЭДИ точку ПО обозначим как А, а горизонтальную проекцию расстояния до нее –  $r_B$ .

Рассмотрим последовательность расчета сигналов ЭМГ с использованием прямого метода.

### Определение параметров активного участка протяженного объекта и координат его точек относительно центра осей ЭДИ

Определим следующие величины:

- расстояние  $r$  от центра дипольных излучателей (ЭДИ) до ПО:  $r = (r_B^2 + h^2)^{0,5}$ ;
- половину длины активного участка ПО:  $L_A = Lw \cos \psi$ , где  $\psi = \arcsin(r_B/Lw)$ ;
- координаты центра активного участка ПО (т. А на рис. 2):  $x_i = r_B \sin(\gamma_i)$ ,  $y_i = r_B \cos(\gamma_i)$ , где  $\gamma_1 = \gamma_0 - \alpha$  (для ЭДИ<sub>1</sub>),  $\gamma_2 = \gamma_0 + \alpha$  (для ЭДИ<sub>2</sub>),  $i$  – индекс ЭДИ (0...2);
- длину отрезков ПО, рассматриваемых как ДИ:  $l_a = 20R_A$ ;
- половину числа отрезков активной части ПО, рассматриваемых как ДИ:  $N_A = L_A/l_a$  (округляется до целого);
- координаты отрезка ПО (т.  $A_m$  на рис. 2):  $x'_{im} = x'_i + mdx'_i$ ,  $y'_{im} = y'_i + mdy'_i$ , где  $m = 0 \dots 2N_A$  – номер отрезка (начиная с крайнего, отмеченного точкой  $A_0$ );  $i$  – индекс ЭДИ;  $x'_i = x_i - (N_A + 0,5)dx'_i$ ,  $y'_i = y_i - (N_A + 0,5)dy'_i$  – горизонтальные координаты точки  $A_0$ ,  $dx'_i = l_a \cos \gamma_i$ ,  $dy'_i = -l_a \sin \gamma_i$ .



### Определение компонент электрического поля, наведенного ЭДИ на отрезке ПО

1. Разделим ЭДИ (по длине) на несколько ДИ длиной  $le = h_{\min}/10$  и определим число таких ДИ  $N_{Ei} = L_{Ei}/le$ , округлив в сторону увеличения до четного, а затем уточним размер такого ДИ для каждого ЭДИ:  $le_i = L_{Ei}/N_{Ei}$  ( $L_{E0} = Ld$ ,  $L_{E1} = L_{E2} = Ld/\sin\alpha$ ,  $h_{\min}$  – минимальная высота движения АНПА над грунтом дна).

2. Найдем координаты отрезков ПО относительно этих ДИ: определим  $dx_{ij} = le_i [(0,5(N_{Ei} - 1) - j)]$ , где  $i$  – индекс ЭДИ,  $j$  – индекс ДИ, тогда  $x'_{ij} = x'_{im} + dx_{ij}$ ,  $y'_{ij} = dy'_{im}$ ,  $z_{0j} = h + R_s - Z_s$ ; для ЭДИ<sub>1,2</sub> ДИ располагаются на нижней поверхности корпуса по кривым эллипса, и вертикальная координата соответственно определяется как  $z_{ij} \approx h + R_s [1 - (l_s + dx_{ij})^2 / (L_{Ei})^2]^{0,5}$ , где  $l_s = 0,5 [(R_s^2 + Ld^2)^{0,5} - L_{Ei}]$  – начальное смещение.

3. Вычислим компоненты напряженности электрического поля в горизонтальной плоскости в месте нахождения отрезка ПО. Для этого воспользуемся выражениями для модулей составляющих электрического поля ДИ в сферической системе координат, приведенных в [6]:

$$\begin{aligned} E_{rij} &= M_{Ei} \cos \Theta_{ij} B_{ij} D_{ij} / (2\pi \sigma r_{ij}'^3), \\ E_{\Theta ij} &= M_{Ei} \sin \Theta_{ij} C_{ij} D_{ij} / (4\pi \sigma r_{ij}'^3), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_{Ei} = I_{Ei} le_i$  – электрический момент ДИ;  $r_{ij}' = (x_{ij}'^2 + y_{ij}'^2 + z_{ij}'^2)^{0,5}$ ;  $\sin \Theta_{ij} = z_{ij}' / r_{ij}'$ ;  $\cos \Theta_{ij} = x_{ij}' / r_{ij}'$ ;  $\varphi_{ij} = \arctg(z_{ij}' / y_{ij}')$ ;  $r_{ij}'$ ,  $\Theta_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$  – сферические координаты, в центре которых помещен ДИ, причем  $\Theta_{ij}$  – угол между  $M_{Ei}$  и  $r_{ij}'$ , а  $\varphi_{ij}$  – угол между

проекцией  $r_{ij}'$  на плоскость, перпендикулярную  $M_{Ei}$ , и осью  $Y_{ij}$ ;  $B_{ij} = (1 + \sqrt{2}kr_{ij}' + (kr_{ij}')^2)^{0,5}$ ;  $k = \sqrt{\omega\sigma\mu}$  – волновой параметр;  $C_{ij} = (1 + \sqrt{2}kr_{ij}' + (kr_{ij}')^2 + \sqrt{2}(kr_{ij}')^3 + (kr_{ij}')^4)^{0,5}$ ;  $D_{ij} = \exp(-kr_{ij}'/\sqrt{2})$ ;  $\omega$  – круговая частота. Используя известные соотношения, перейдем от сферической системы координат к декартовой и найдем составляющие (проекции) наведенного ДИ электрического поля в горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned} E_{Xij} &= E_{rij} \cos \Theta_{ij} + E_{\Theta ij} \sin \Theta_{ij}, \\ E_{Yij} &= (E_{rij} \sin \Theta_{ij} - \\ &- E_{\Theta ij} \cos \Theta_{ij}) \cos \varphi_{ij}. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) учитывается влияние частоты на пространственное изменение поля. Однако при малости волновых чисел, то есть при условии  $kr \ll 1$ , изменение поля практически не зависит от частоты и его можно рассматривать в стационарном приближении. При этом выражения (1), (2) заменяются более простыми формулами составляющих напряженности ЭМП в прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned} E_{Xij} &= M_{Ei} (2x_{ij}'^2 + y_{ij}'^2 + z_{ij}'^2) / (4\pi \sigma r_{ij}'^5), \\ E_{Yij} &= M_{Ei} x_{ij}' y_{ij}' / (4\pi \sigma r_{ij}'^5). \end{aligned} \quad (3)$$

4. Электрическое поле, наведенное ЭДИ в месте расположения отрезка ПО в направлении вдоль ПО, определяется выражением:

$$E_{Aim} = \sum_{j=0}^{N_{Ei}-1} E_{Aij},$$

где  $E_{Aij} = E_{Xij} \cos \gamma_i - E_{Yij} \sin \gamma_i$ .

### Определение воздействия возбуждаемого тока на ДПП

1. Найдем значение тока, наведенного в отрезке протяженного объекта. Расчет произво-

дим как для плоской пластины (свернутой в цилиндр).

Распределение напряженности поля по поверхности отрезка ПО (вдоль) имеет вид [5]:

$$E_{ni} = E_{Aim} |x''| / (|x''^2 - 0,25la^2|^{0,5}),$$

где  $x''$  – координата точки на поверхности цилиндрического отрезка ПО в цилиндрической системе координат в направлении оси ПО (нулевое значение в точке  $A_m$ ).

Суммарный ток, концентрируемый на поверхности отрезка ПО, таким образом, определится как

$$I_{Aim} = 2E_{Aim} \pi \sigma R_A.$$

$$\int_{-la/2}^{la/2} |x''| dx'' / (|x''^2 - 0,25la^2|^{0,5}).$$

При вычислении интеграла (численным методом) следует учесть необходимость обхода (исключения) краевых точек первого вида ( $x'' = -la/2$ ,  $x'' = la/2$ ), напряженность в которых достигает бесконечно больших значений, а направление вектора неопределенно.

2. Определим изменение напряженности электрического поля, вызванного током через ПО, в месте расположения дифференциального приемника.

Координаты отсчитываются от точки  $A_m$  (ось  $X_A$  вдоль ПО), при этом координата  $y_{Am} = -r_B$ . Координаты  $x_{Am} = L_A + (0,5 - m)la$ ,  $z_{Am} = -(h + R_s - Z_R)$ .

Напряженность поля, наведенного протекающим в ПО током в месте расположения ДПП, определяется выражениями, аналогичными (1) и (2):

$$\begin{aligned} E_{rim} &= M_{Aim} \cos \Theta_m B_m D_m / (2\pi \sigma r_{Am}^3), \\ E_{\Theta im} &= M_{Aim} \sin \Theta_m C_m D_m / (4\pi \sigma r_{Am}^3), \end{aligned}$$

где  $M_{\Theta im} = la I_{Aim}$ ;

$$r_{Am} = (x_{Am}^2 + y_{Am}^2 + z_{Am}^2)^{0,5};$$

$$\cos \Theta_m = x_{Am} / r_{Am};$$

$$\varphi_m = \arctg(z_{Am} / y_{Am});$$

$$\sin \Theta_m = z_{Am} / (r_{Am} \sin \varphi_m).$$

В декартовых координатах (относительно ПО) компоненты вектора изменения напряженности поля, вызванного протекающим в ПО током в месте расположения ДПП, определяются как

$$E_{Xi} = \sum_{m=1}^{2Na} E_{Xim},$$

$$E_{Yi} = \sum_{m=1}^{2Na} E_{Yim},$$

где  $E_{Xim} = E_{rim} \cos \Theta_m + E_{\Theta im} \sin \Theta_m$ ,

$$E_{Yim} = (E_{rim} \sin \Theta_m - E_{\Theta im} \cos \Theta_m) \cos \varphi_m$$

$$\text{или } E_{Xim} = M_{Aim} (2x_{Am}^2 + y_{Am}^2 + z_{Am}^2) / (4\pi\sigma r_{Am}^5),$$

$E_{Yim} = M_{Aim} x_{Am} y_{Am} / (4\pi\sigma r_{Am}^5)$  при расчете поля в стационарном приближении.

Наведенные на электродах ДПП напряжения:

$$U_0 = (E_{X0} \sin \gamma_0 - E_{Y0} \cos \gamma_0) L_{R0},$$

$$U_1 = [E_{X1} \sin(\gamma_0 - \beta) - E_{Y1} \cos(\gamma_0 - \beta)] L_{R1},$$

$$U_2 = [E_{X2} \sin(\gamma_0 + \beta) - E_{Y2} \cos(\gamma_0 + \beta)] L_{R2},$$

где  $L_{R0}$ ,  $L_{R1}$ ,  $L_{R2}$  – межэлектродные расстояния ДПП.

При проверке расчеты сигналов ДПП по формулам (1), (2) для частот до 2 кГц дают практически одинаковые результаты с расчетами для стационарного приближения по формулам (3), а на частотах 4 кГц и выше дают малозначительное (на единицы процентов) повышение показаний.

Как иллюстрация предварительной оценки сигналов ЭМГ на этапе проектирования ниже показаны диаграммы зависимостей сигналов от угла отклонения (рассчитанные по указанной методике) для двух вариантов расположения приемных электродов:

1) для конструкции ЭМГ, установленного на АНПА

«Клавесин» при углах отклонения осей ЭДИ  $\alpha = 19^\circ$  и ДПП  $\beta = 19,3^\circ$  (см. рис. 3);

2) для того же ЭМГ, но с расположением приемных электродов, при котором обеспечивается дифференциальный прием, т.е. при  $\alpha = 19^\circ$  и  $\beta = 62,5^\circ$  (см. рис. 4).

Из приведенных диаграмм видно, что второй вариант расположения электродов ЭМИ предпочтительней, особенно при использовании ЭМИ для

отслеживания протяженных объектов при небольших углах отклонения (до  $\pm 30^\circ$ ) благодаря более высоким уровням сигналов. С другой стороны, оценка самого угла отклонения для этого варианта затруднена из-за почти полной симметрии характеристик сигналов (относительно нуля) и возможна только при использовании числовых методов расчетов с применением предложенной методики.

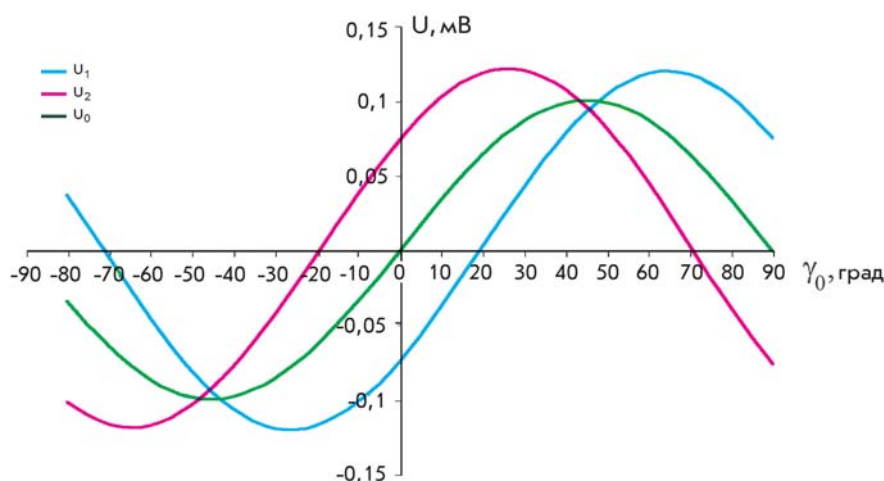


Рис. 3. Зависимости сигналов ЭМИ от угла отклонения  $\gamma_0$  при  $\alpha = 19^\circ$ ,  $\beta = 19,3^\circ$  ( $r_b = 1$  м,  $h = 1,8$  м,  $f = 4$  кГц,  $\sigma = 4$  См/м,  $R_A = 0,008$  м)

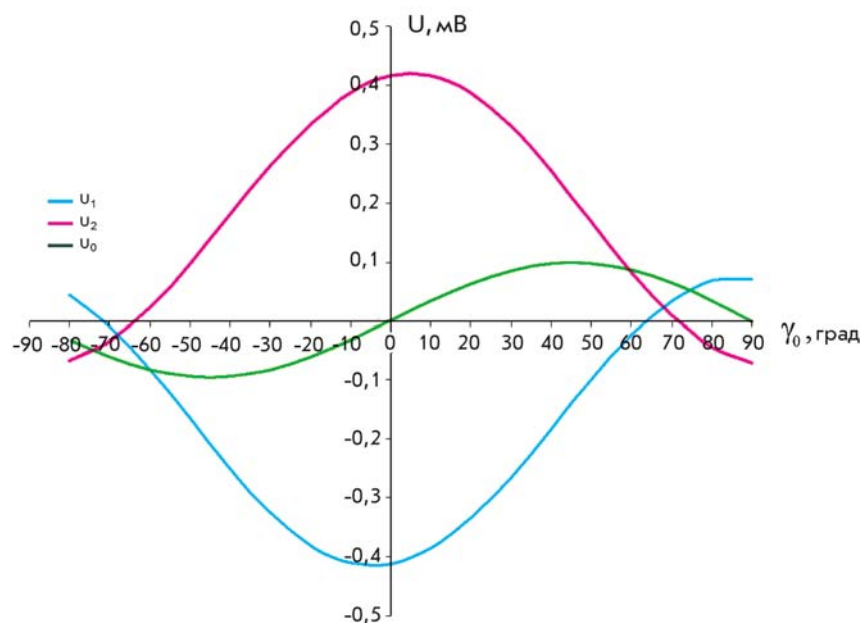


Рис. 4. Зависимости сигналов ЭМИ от угла отклонения  $\gamma_0$  при  $\alpha = 19^\circ$ ,  $\beta = 62,5^\circ$  ( $r_b = 1$  м,  $h = 1,8$  м,  $f = 4$  кГц,  $\sigma = 4$  См/м,  $R_A = 0,008$  м)

### Экспериментальная проверка метода расчета

Для практической проверки достоверности расчетов по приведенной методике использовались результаты натурных испытаний ЭМГ [8]. В качестве протяженного объекта использовался отрезок металлического кабеля длиной около 800 м, специально для этого проложенный на морском дне. Расчеты делались для моментов, в которые производилась видеосъемка дна моря. По полученным видеокамерой снимкам из-

мерялись как угол отклонения  $\gamma_0$ , так и расстояние до кабеля  $r_B$  с учетом масштаба снимков и высоты (расстояния до дна по показаниям эхолота). Рабочая частота ЭМГ составляла 4 кГц. Расчеты производились по формулам (3) для стационарного приближения. Реальное расположение электродов ДПП на АНПА не обеспечивало полностью дифференциального приема. Поэтому для сравнения использовались не первичные, а скорректированные сигналы ЭМГ  $U_{1k} = U_1 - U_1(h)$ ,  $U_{2k} = U_2 - U_2(h)$ , где  $U_1$ ,  $U_2$  – первичные

сигналы. Сигналы коррекции  $U_1(h)$ ,  $U_2(h)$  как зависимости первичных сигналов от высоты вырабатывались программой-драйвером ЭМГ по ходу работы при движении АНПА перед отслеживанием. Отклонения вычисленных значений сигналов от реальных ( $U_{1k}$ ,  $U_{2k}$ ) не превысили 18%. Таким образом, полученные результаты проверки можно считать удовлетворительными, с учетом того, что точность приборов, используемых при калибровке измерительных каналов ЭМГ, лежит в пределах 10%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Устройство для обнаружения и отслеживания металлосодержащего протяженного объекта с борта подводной поисковой установки. Патент № 2280268, БИ № 20, 2006.
2. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2001. Вып. 4. С. 71–90.
3. Агеев М.Д., Витковская Л.Г., Кукарских А.К., Мокеев В.Ю. Устройство для обнаружения и отслеживания электропроводного протяженного подводного объекта с борта подводной поисковой установки. Патент № 2174244, БИ № 27, 2000.
4. Сочнев А.Я. Расчет напряженности поля прямым методом. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Зимин Е.Ф., Коганов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоиздат, 1985.
6. Калашников Н.И., Дудкин Ф.Л., Николаенко Ю.Б. Основы морской электроразведки. Киев: Наукова думка, 1980.
7. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 46–51.
8. Кукарских А.К., Павин А.М. Электромагнитный искатель для обнаружения и отслеживания металлосодержащих подводных протяженных объектов // Приборы. 2008. № 4. С. 33–38.
9. Inzartsev A.V., Kukarskikh A.K., Pavin A.M. Using of Electromagnetic Searcher for Inspection of Metallic Cable by Means of AUV // Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE Kobe-Techno-Ocean'08 (OTO'08), Kobe, Japan, April 8–11, 2008.

