

УДК 551.46.077. 629.584

ОБНАРУЖЕНИЕ, ОТСЛЕЖИВАНИЕ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

Е.А. Ивлиев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет¹

Рассматриваются электромагнитные методы обнаружения, отслеживания и обследования подводных трубопроводов и кабелей. Электромагнитные методы позволяют обнаруживать трубопроводы и находить повреждение изоляции. Для обнаружения могут быть использованы как собственные электромагнитные поля трубопроводов и кабелей, так и электромагнитные поля, наведенные внешними источниками. Приведены примеры, иллюстрирующие электромагнитные методы обнаружения, отслеживания и обследования подводных трубопроводов.

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени при эксплуатации нефте- и газопроводов необходимость их обследования в водной среде возникала только на подводных переходах рек, озер и водохранилищ. Однако в 2005 году был введен в эксплуатацию газопровод по дну Черного моря «Голубой поток», проложена сеть трубопроводов на шельфе вблизи острова Сахалин, проектируются трубопроводы по дну Балтийского и Черного морей, начинается освоение шельфовых месторождений нефти и газа в Баренцевом и Северном морях. В связи с этим остро встает проблема обеспечения безопасной эксплуатации подводных трубопроводных систем. Данные проблемы возникают и при обслуживании морских кабелей связи и морских униполярных передач постоянного тока (УППТ). Развитые страны для этих целей используют специализирован-

ные суда и подводные аппараты (ПА), которые выполняют обследование трубопроводов и кабелей не реже одного-двух раз в год.

Основные трудности при обследовании морских трубопроводов и кабелей с помощью подводных аппаратов связаны с тем, что на мелководных участках они заглубляются в морской грунт. Это обусловлено необходимостью обеспечения защиты трубопроводов и кабелей от случайного повреждения якорными системами судов или орудиями лова. В ряде случаев гидроакустические средства оказываются малоэффективными и для обнаружения и отслеживания протяженных электропроводящих систем могут использоваться методы, основанные на измерении параметров электромагнитных полей (ЭМП).

Обследование подводных трубопроводов связано с решением следующих задач:

1) определение положения трубопровода относительно профиля дна;

2) проверка состояния катодной или протекторной защиты;

3) определение повреждения защитного покрытия трубопроводов и кабелей;

4) определение утечек газа или нефтепродуктов из трубопроводов.

При обследовании трубопроводов или кабелей с помощью ПА различают режим обнаружения трубопровода и режим отслеживания [1]. В первом случае для определения расположения трубопровода относительно донного грунта ПА ходит галсами преимущественно перпендикулярно трубе, а во втором перемещается с небольшими отклонениями вдоль оси трубопровода.

Определение наличия утечек газа осуществляется, например, непрерывным измерением уровня шума вблизи трубопровода, а для определения утечки нефтепродуктов используются анализаторы углеводородов. Однако эти методы требуют нахождения ПА в непосредственной близости от трубопровода.

Все электромагнитные методы обследования, обнаружения и отслеживания трубопроводов и кабелей с помощью ПА разобьем на три основные группы:

1) методы, основанные на измерениях собственных первичных ЭМП трубопроводов и кабелей;

2) методы, основанные на измерениях вторичных ЭМП, которые создаются токами, наведенными в трубопроводах излучающими системами, установленными непосредственно на ПА;

¹ 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, тел.: (812) 714-07-61, факс: (812) 713-81-09. E-mail: office@smtu.ru

3) методы, основанные на измерениях вторичных ЭМП, которые создаются токами, наведенными в трубопроводах с помощью не зависящих от ПА источников питания.

В режиме отслеживания электромагнитные методы используются для удержания ПА как можно ближе к трубопроводу, что позволяет контролировать защитный потенциал и плотность тока системы катодной или протекторной защиты, а также находить утечки из нефте- и газопроводов.

■ Методы первой группы

В данном случае используется или собственное магнитное поле трубопровода или электромагнитное поле токов, протекающих в кабеле.

Любые ферромагнитные объекты, помещенные в магнитное поле Земли (T), намагничиваются (в том числе и протяженные трубопроводы). Магнитное состояние трубопровода обусловлено не только его географическим положением, но и направлением его прокладки относительно магнитного меридиана. В географической системе координат x', y', z' элементы земного магнетизма показаны на рис. 1, где H - горизонтальная составляющая, Z - вертикальная составляющая, Y - восточная составляющая, X - северная составляющая, D - угол магнитного склонения. При этом вертикальная компонента магнитного поля Земли (Z) формирует в системе координат x, y, z , связанной с трубопроводом, вертикальное намагничивание трубопровода J_z , а горизонтальная (H) - поперечное J_y и продольное J_x намагничивания. Индуцированная намагниченность создает свое вторичное магнитное поле, которое может быть использовано для обнаружения трубопровода.

Продольное намагничивание J_x , какой бы интенсивности оно не было, вне трубопровода магнитного поля не создает, так как его реакция на внешнее пространство аналогично полю бесконечного соленоида, для которого внешнее поле равно нулю [2]. Поэтому только поперечное и вертикальное намагничивания создают дополнительное вторичное магнитное поле вокруг трубы. Вторичное магнитное поле, вызванное поперечным и вертикальным намагничиванием, убывает с расстоянием от оси трубопровода как $\sim 1/r^2$. Возможные локальные неоднородности намагничивания трубопровода, возникающие в местах сварных швов или механических напряжений, создают магнитное поле, убывающее с расстоянием как $\sim 1/r^3$. Поэтому они не оказывают существенного влияния на характеристики вторичного магнитного поля трубопровода.

Вертикальное и поперечное намагничивания эквивалентны магнитному полю дипольных нитей с удельным магнитным моментом на единицу длины p_y и p_z , расположенных на оси трубопровода.

Величины удельных магнитных моментов зависят от параметров магнитного поля Земли, геометрических и магнитных

параметров трубопровода, и имеют вид [2]:

$$p_y = \frac{2\pi B_y^0 r_2^2 (r_1^2 - r_2^2) (\mu^2 - 1)}{(\mu - 1)^2 r_1^2 - (\mu + 1)^2 r_2^2};$$

$$p_z = \frac{2\pi B_z^0 r_2^2 (r_1^2 - r_2^2) (\mu^2 - 1)}{(\mu - 1)^2 r_1^2 - (\mu + 1)^2 r_2^2},$$

где μ - относительная магнитная проницаемость материала трубопровода, r_1 и r_2 - внутренний и наружный диаметр трубопровода, B_y^0 и B_z^0 - компоненты магнитного поля Земли в координатах трубопровода (см. рис.1).

Вторичные магнитные поля, создаваемые намагниченной трубой, определяются по формулам [2]:

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(p_z \frac{z^2 - y^2}{r^4} + p_y \frac{2yz}{r^4} \right);$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(p_y \frac{2yz}{r^4} - p_z \frac{z^2 - y^2}{r^4} \right),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

В мировой практике для передачи электроэнергии на значительные расстояния через водные районы широко применяются морские униполярные передачи постоянного тока, в которых одним из проводников

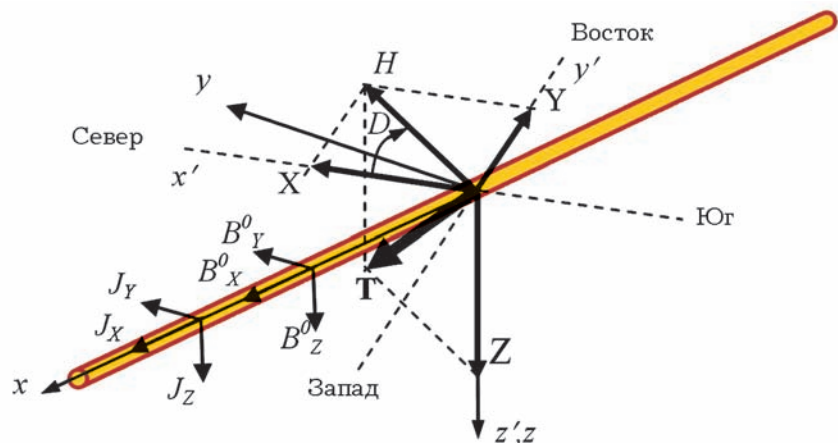


Рис. 1. Схема намагничивания трубопровода в магнитном поле Земли

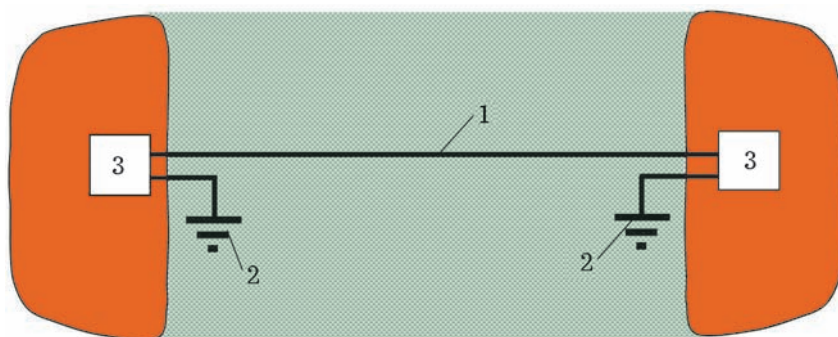


Рис. 2. Схема морской униполярной передачи постоянного тока

является морская вода. Схема такой передачи показана на рис. 2, где 1 - подводный однополярный кабель, 2 - морские электроды, 3 - преобразовательные подстанции (в зависимости от направления тока в подводном кабеле одна из них преобразует переменный ток в постоянный, а вторая - наоборот).

Таких передач в мире построено более 20, только в Балтийском море их 5. Данные передачи имеют не только меньшие потери по сравнению с передачами переменного тока, но и позволяют исключить влияние одной энергосистемы на другую.

Величина постоянного тока в подводном кабеле такой передачи достигает 5000А. Тем самым вокруг кабеля создается интенсивное постоянное магнитное поле. Постоянное электрическое поле у кабелей морской УППТ отсутствует и наблюдается только в непосред-

ственной близости от электродов. Силовые линии магнитной индукции представляют собой окружности с центром на оси кабеля. Простая структура магнитного поля позволяет легко построить алгоритмы обнаружения и отслеживания кабельной трассы с помощью подводного аппарата.

Поскольку наряду с постоянной составляющей присутствуют и пульсации тока до 1-2% (амплитуды пульсаций достигают 100А), то возникает и переменное электромагнитное поле, обладающее как индукцией магнитного, так и напряженностью электрического полей. При этом электрическое поле является чисто вихревым и не обладает потенциальной составляющей. Структура переменного магнитного поля та же, что и у постоянного магнитного поля, а электрическое поле параллельно направлению тока в кабеле (рис.3).

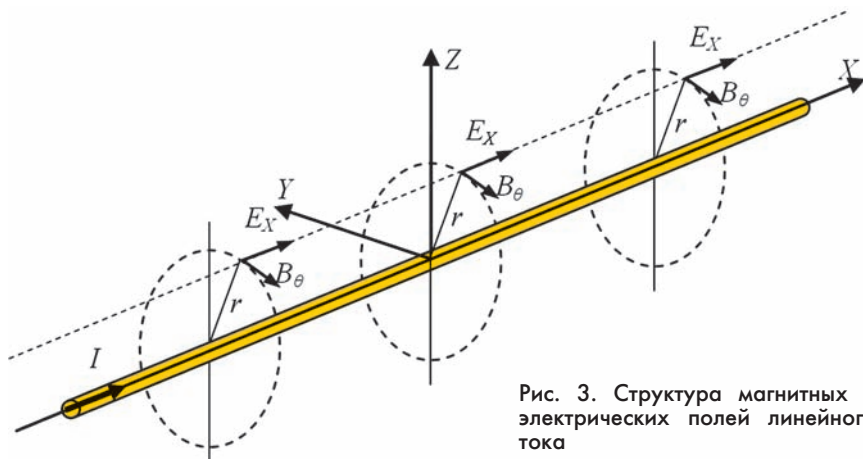


Рис. 3. Структура магнитных и электрических полей линейного тока

■ Методы второй группы

Для реализации методов второй группы на ПА устанавливается излучающая система магнитного или электрического типов. Излучающая система магнитного типа представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником или без него. Излучающая система электрического типа выполняется в виде электрического диполя и конструктивно состоит из двух разнесенных электродов и соединительного кабеля. Эти излучающие системы создают в окружающей среде первичное переменное электромагнитное поле, которое наводит в трубопроводе ЭДС, которая, в свою очередь, является источником тока в трубопроводе. Приемная система может содержать измерительные преобразователи для регистрации компонент или модуля индукции магнитного поля, а также аналогичных параметров напряженности электрического поля.

Два примера возможных схем компоновки приемно-излучающих систем на ПА показаны на рис.4, где ИА - излучающая антенна магнитного (рис.4,а) либо электрического типов (рис.4,б), а, б, с и d - места расположения первичных преобразователей для измерения компонент или модуля индукции магнитного или напряженности электрического полей.

В общем случае излучающая антенна на ПА может иметь продольную (вдоль оси X'), поперечную (вдоль оси Y') или вертикальную (вдоль оси Z') ориентации. Излучающих антенн может быть несколько. Они могут быть комбинированными, т.е. на ПА могут быть одновременно размещены антенны разных типов.

Первичные преобразователи могут измерять компонен-

ты электрического E_x, E_y, E_z или магнитного B_x, B_y, B_z полей в точках a, b, c и d или значения модулей $|B_a|, |B_b|, |B_c|, |B_d|$, а также $|E_a|, |E_b|, |E_c|, |E_d|$. Могут быть также использованы комбинированные индуктивные первичные преобразователи магнитной и электрической составляющих переменного ЭМП [3].

Выбор того или иного вида излучающей системы, а также типа и ориентации измерительных осей преобразователей обуславливается той задачей, которая ставится перед ПА при обнаружении, отслеживании и обследовании подводного трубопровода или кабеля. Некоторые конкретные примеры приведены в конце статьи.

При любом способе возбуждения тока в трубопроводе в окружающем пространстве возникает вторичное переменное электромагнитное поле. Картина распределения мгновенных значений амплитуд электрического и магнитного векторов поля показана на рис.3.

Вектор напряженности электрического поля имеет одну компоненту E_x , параллельную оси трубопровода. Вектор индукции магнитного поля тоже имеет только одну компоненту B_θ , касательную к окружностям, центр которых совпадает с осью трубопровода. Аналогичное распределение индукции постоянного магнитного поля наблюдается вокруг кабеля морской УППТ.

На рис.5 показана схема измерения электрического и магнитного полей, где X, Y, Z - система координат, связанная с трубопроводом, X', Y', Z' - система координат, связанная с ПА. Оси Z и Z' совпадают.

Широкие возможности в выборе типа и ориентации излучающих антенн, а также типа и ориентации измерительных осей первичных преобразователей позволяют решать

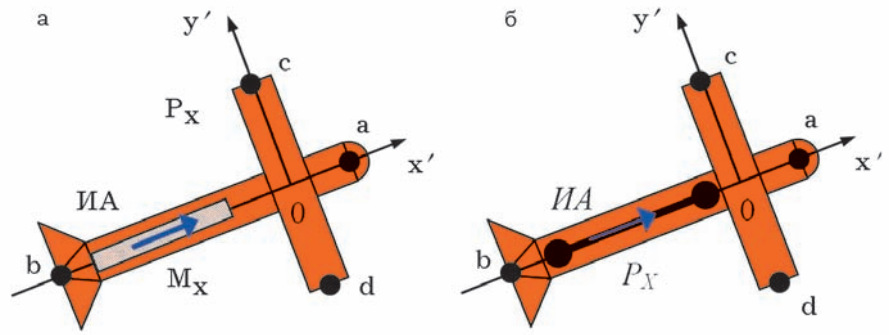


Рис.4. Возможные схемы установки приемных и излучающих антенн на подводном аппарате

многочисленные задачи, возникающие при обнаружении, отслеживании и обследовании подводных трубопроводов или кабелей электромагнитными методами. Например, определять по данным измерений вторичных электромагнитных полей, с какой стороны от трубопровода или кабеля находится ПА, а также находить значение угла α , под которым ПА пересекает трассу трубопровода в режиме отслеживания.

Рассмотрим задачу определения ЭДС в металлическом трубопроводе при прохождении над ним ПА, имеющего излучающие системы в виде магнитного или электрического диполя. Скорость перемещения ПА будем считать малой, а окружающую среду - однородной. Перемещение ПА происходит на высоте h над трубой и под углом α к оси трубопровода (рис.5). Помехи от грунта, связанные с креном, дифферентом и изменением положения ПА относительно дна, не учитываются.

Трубопровод или проводящую оболочку кабеля можно рассматривать как замкнутый (на бесконечности) линейный контур. Тогда в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея при изменении магнитного потока (Φ) сквозь данный контур (за счет переменного ЭМП, создаваемого из-

лучающей антенной) в данном контуре возникают ЭДС индукции и как следствие - электрический ток.

ЭДС индукции можно определить по известной формуле

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S},$$

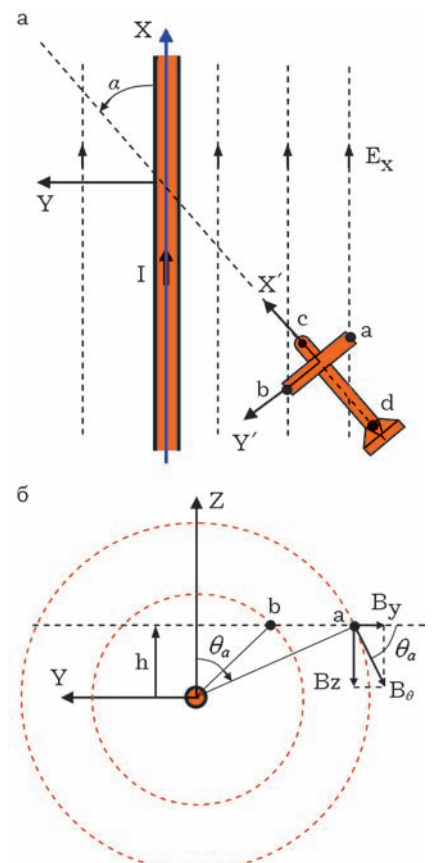


Рис.5. Схема использования вторичного электромагнитного поля для отслеживания подводного трубопровода или кабеля: а - отслеживание по вторичному электрическому полю; б - отслеживание по вторичному магнитному полю

где интегрирование выполняется по полуплоскости, ограниченной осевой линией трубопровода и бесконечностью.

Наиболее просто (исключая интегрирование по поверхности) ЭДС индукции можно найти с помощью теоремы взаимности. В соответствии с теоремой взаимности [4] ЭДС, создаваемая в линейном проводнике переменным магнитным диполем с магнитным моментом \mathbf{M} , находящимся в точке с координатами (x, y, z) , будет иметь вид:

$$e = \frac{-i\omega \mathbf{M} \cdot \mathbf{B}(x, y, z)}{I}, \quad (1)$$

а ЭДС от переменного электрического диполя с моментом \mathbf{P} будет:

$$e = \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{E}(x, y, z)}{I}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}(x, y, z)$ и $\mathbf{E}(x, y, z)$ - амплитуды индукции магнитного и напряженности электрического полей, создаваемых в точке (x, y, z) током I , протекающим по оси трубопровода, i - мнимая единица (зависимость от времени принята в виде $e^{i\omega t}$, где ω - частота излучаемого поля генераторной антенной).

Возникающий при этом ток индукции в силу непрерывности электрического тока будет протекать во всем линейном контуре (т.е. вдоль всего трубопровода или проводящей оболочки кабеля), т.е. источник ЭДС возникает на ограниченном отрезке трубопровода (вследствие затухания электромагнитного поля излучающей антенны в проводящей среде), а ток распространяется до бесконечности. В реальных условиях, в силу наличия проводящей внешней среды (особенно морской воды) и несовершенства изоляции ток вдоль трубопровода будет постепенно падать относительно места возбуждения ЭДС индукции (за счет тока утечки через

изоляцию трубопровода или кабеля). Но все равно его «эффективная длина» гораздо больше расстояния от трубопровода до ПА, и для расчета вторичного магнитного и электрического полей можно вполне обоснованно пользоваться расчетной моделью рис.3.

Поскольку формулы (1) и (2) содержат скалярные произведения двух векторов, то, учитывая структуру магнитного и электрического полей (рис.3), из них следует, что при возбуждении тока в трубопроводе магнитным диполем максимальное значение ЭДС будет тогда, когда магнитный диполь ортогонален к оси трубопровода. ЭДС равна нулю, если направление магнитного диполя параллельно оси трубопровода. При возбуждении трубопровода электрическим диполем картина обратная. Максимальное значение ЭДС - если момент электрического диполя направлен параллельно оси трубопровода, и ЭДС равна нулю при ортогональном направлении электрического диполя к оси трубопровода.

Отсюда непосредственно следует, что:

- для определения местоположения трубопровода дипольный момент излучающей антенны магнитного типа должен быть направлен или вдоль направления движения ПА, или вертикально;
- для режима отслеживания трассы трубопровода дипольный момент излучающей антенны магнитного типа должен иметь поперечную (относительно направления движения ПА) или вертикальную ориентацию;
- для определения местоположения трубопровода дипольный момент излучающей антенны электрического типа должен быть ориентирован поперечно относительно направления движения ПА;

- для режима отслеживания трассы трубопровода дипольный момент излучающей антенны электрического типа должен иметь продольную ориентацию относительно направления движения ПА;

Выражения для соответствующих компонент поля, показанных на рис.3, имеют вид [5]:

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I \gamma_B}{2\pi} K_1(\gamma_B r); \quad (3)$$

$$E_x = -\frac{i\omega \mu_0 I}{2\pi} K_0(\gamma_B r), \quad (4)$$

где $\gamma_B = \sqrt{i\omega \mu_0 \sigma_B}$ - постоянная распространения электрического поля в воде; σ_B - удельная электрическая проводимость воды, K_0 , K_1 - модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

При малых значениях волнового расстояния $\gamma_B r \ll 1$ формула (3) принимает хорошо известный вид $B_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. При тех же условиях для напряженности электрического поля имеем

$E_x = \frac{I \gamma_B^2}{2\pi \sigma} \ln|\gamma_B r|$, т.е. магнитная компонента убывает пропорционально $\frac{1}{r}$, а электрическая компонента переменного электромагнитного поля - еще медленнее.

Для вертикально ориентированной излучающей антенны магнитного типа из (1) и (3) получим:

$$e = \frac{-i\omega \mu_0 \gamma_B M_z \cos\theta}{2\pi} K_1(\gamma_B r), \quad (5)$$

а из (2) и (4) для электрического диполя, ориентированного по оси X' :

$$e = -\frac{i\omega \mu_0 P_x \cos\alpha}{2\pi} K_0(\gamma_B r). \quad (6)$$

Начальный ток в трубопроводе $I(0)$ находим по формуле:

$$I(0) = \frac{e}{Z_B}. \quad (7)$$

Волновое сопротивление Z_B согласно [6] имеет вид:

$$Z_B = \frac{\omega \mu_0 \gamma_T}{2\pi k_H} \ln \frac{b}{a}, \quad (8)$$

где a - радиус металлической трубы, b - радиус изоляционного покрытия, $k_H = \sqrt{\omega^2 \epsilon_H \epsilon_0 \mu_0 - i\omega \mu_0 \sigma_H}$ - волновое число изоляции, ϵ_H - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, σ_H - удельная электрическая проводимость изоляции, γ_T - постоянная распространения поля в трубопроводе, $\epsilon_0 = 10^{-9} / (36\pi)$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Постоянная распространения поля в трубопроводе определяется по формуле [6]:

$$\gamma_T = k_H \left[1 - \frac{i}{k_M a \ln(b/a)} + \frac{H_0^{(2)}(k_B b)}{k_B b \ln(b/a) H_1^{(2)}(k_B b)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где $k_M = \sqrt{-i\omega \mu_0 \sigma_M}$, $k_B = \sqrt{-i\omega \mu_0 \sigma_B}$ - волновые числа металлического трубопровода и воды, σ_M - удельная электропроводимость стали, $H_1^{(2)}$ и $H_0^{(2)}$ - функции Ханкеля второго рода нулевого и первого порядка.

Для частот более 100 Гц толщина скин-слоя не превышает толщину стенки трубы. Поэтому в формулах (8) и (9) она не учитывается.

Поскольку в режиме отслеживания излучающая и приемная системы ПА находятся в непосредственной близости от трубопровода, затухание наведенного тока по длине трубопровода учитывать не нужно.

К методам второй группы относится и метод, разработанный в Институте проблем мор-

ских технологий (ИПМТ) ДВО РАН. Наиболее полно идея метода описана в работе [1]. Метод основан на контактном («гальваническом») способе возбуждения вторичного электрического поля и измерения электрической составляющей этого поля. Вторичное поле возбуждается электрическими диполями, и измеряется электрическая компонента электромагнитного поля. При гальваническом воздействии на трубопровод возбуждение носит локальный (поперечный) характер и не приводит к возникновению продольного тока, поэтому вторичное электрическое поле бу-

дет убывать как $\frac{1}{r^2}$. Измеряемой характеристикой является электрический потенциал. Для измерения одной составляющей напряженности электрического поля используются два контактных электрода, разнесенных на некоторое расстояние. Метод может работать даже тогда, когда в излучающих диполях протекает постоянный ток.

В данной работе метод возбуждения источника вторичного поля является индукционным «негальваническим». При этом индуцируется протяженный линейный источник (переменный продольный электрический ток) с законом убывания

вторичного поля, близким к $\frac{1}{r}$. В отличие от [1] индукционное возбуждение тока возможно даже в непроводящей среде (например, в воздухе) и при любом состоянии изоляционного покрытия подводного трубопровода или кабеля. Измеряемыми характеристиками являются или компонента индукции переменного магнитного поля, или компонента индукции напряженности переменного электрического поля, или их модули. Для измерения напряженности электрического поля используется не два потенциальных

(контактных) электрода, а один первичный преобразователь, например, индукционный «неконтактный» датчик [3], [7].

■ Методы третьей группы

При реализации методов, основанных на наведении токов в трубопроводах внешними источниками питания, рассмотрим возможные способы возбуждения тока в трубопроводах:

1) последовательное возбуждение (рис.6,а), когда напряжение подано в разрыв трубопровода. При этом в месте возбуждения ток непрерывен, а напряжение изменяется от $-U(0)$ до $+U(0)$;

2) параллельное возбуждение (рис.6,б). В месте ввода напряжение непрерывно, а ток справа налево изменяется скачком от $-I(0)$ до $+I(0)$;

3) индукционное возбуждение источником магнитного типа (магнитным диполем) (рис.6,в). Для возбуждения максимального тока в трубопроводе магнитный момент излучающей системы должен быть ориентирован ортогонально оси трубопровода;

4) индуктивное возбуждение источником электрического типа (электрическим диполем) (рис.6,г). Для возбуждения максимального тока в трубопроводе электрический момент излучающей системы должен быть ориентирован параллельно оси трубопровода.

В первом и втором способах к трубопроводу может подключаться источник как постоянного, так и переменного тока. В последних двух способах индуктивного возбуждения используется источник переменного низкочастотного тока.

Следует отметить, что неконтактное (индукционное) возбуждение тока в трубопроводах широко используется при обследовании подземных

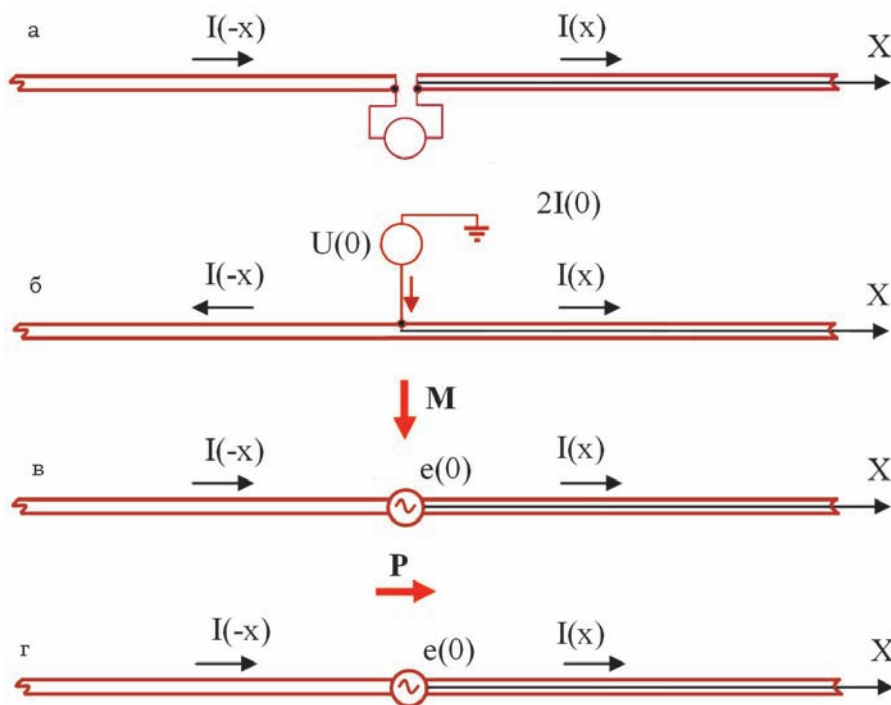


Рис.6. Способы возбуждения тока в трубопроводе

трубопроводов и трубопроводов на переходах через реки и водохранилища [8].

При практической реализации первых двух способов подключение источника питания осуществляется, как правило, на береговой части трубопровода. Последние два способа могут быть реализованы также и для подводной части трубопровода.

Степень затухания наведенного тока в трубопроводе или оболочке кабеля определяется соотношением внутреннего сопротивления и проводимости утечки. Так как в подавляющем большинстве случаев сопротивление изоляции трубопроводов достаточно высокое, токи утечки малы, то наведенные тем или иным способом токи распространяются по трубопроводу на значительные расстояния.

Распределение тока по длине трубопровода определяется по формуле:

$$I(x) = I(0)e^{-\gamma_T x}, \quad (10)$$

где $I(0)$ - ток в месте подключения источника питания или в месте индукционного возбуждения ЭДС в трубопроводе (формула (7)), γ_T - постоянная распространения поля в трубопроводе, определяемая формулой (9).

■ Контроль состояния протекторной и катодной защиты

Контроль состояния протекторной или катодной защиты с помощью подводных аппаратов осуществляется посредством измерения величины, ортогональной к поверхности трубопровода проекции защитной плотности тока. Контроль уровня защитного потенциала, который наиболее распространен при наземных обследованиях трубопроводов [8], в морских условиях практически не реализуем.

Для контроля защитной плотности тока подводный аппарат снабжен датчиком плотности тока.

Протекторная защита трубопроводов или подводных ка-

белей осуществляется в основном кольцевыми протекторами. Примером может служить защита подводного газопровода Экофикс – Эмден протяженностью 443 км. Изолирующее покрытие типа «Сомастик» толщиной 16 см (битум - 15 частей, песок - 65 частей и мел - 20 частей). Диаметр трубы - 914 мм. Поверх изолирующего покрытия установлены протекторы электрохимической защиты. Это массивные сборные кольца из сплавов цинка, магния и алюминия, которые присоединяются к трубе с помощью изолированного медного проводника термической сваркой. Для данного трубопровода были установлены протекторы массой по 454 кг через каждые 132 метра.

■ Обнаружение локальных повреждений изоляционных покрытий трубопроводов и кабелей

Если вдоль трубопровода или кабеля протекает ток, наведенный одним из рассмотренных ранее способов, то при наличии локального повреждения изоляции часть тока будет вытекать во внешнюю среду, образуя около повреждения локальное электромагнитное поле. Аналогичные изменения ЭМП возникают и при работе станции катодной защиты в области нарушения изоляции.

В случае постоянного тока для обнаружения места повреждения изоляции выполняют измерение разности электрических потенциалов неполяризуемыми электродами в процессе движения ПА над трубопроводом.

Для определения локального повреждения изоляции трубопровода посредством измерения электрического потенциала может быть использована расчетная модель, показанная на рис.7, где 1 - изоляционное

покрытие трубопровода, 2 - локальное повреждение изоляции, a - радиус трубопровода, l и φ - размеры повреждения изоляции.

Решение для электрического потенциала U при заданной величине тока I , стекающего с оголенного участка трубопровода, имеет вид [9]:

$$U = \frac{I}{2\pi^2\sigma_B a l} \left\{ \int_0^\infty \frac{\sin(pl)\cos(px)}{p^2} \left[\frac{K_0(pr)}{K_1(pa)} + \frac{4}{\alpha} \sum_{n=1}^\infty \frac{\sin(n\alpha)\cos(n\varphi)K_n(pr)}{n[K_{n+1}(pa) + K_{n-1}(pa)]} \right] dp \right\}, \quad (11)$$

где K_n - модифицированные функции Бесселя первого рода n -го порядка, σ_B - удельная электрическая проводимость воды.

Соотношение (11) позволяет моделировать распределение электрического потенциала при любых значения параметров l и φ , т.е. от линейных трещин до кольцевых повреждений.

Поскольку при катодной защите трубопровода аноды катодной станции находятся на значительном расстоянии от оси трубопровода, данная расчетная модель остается справедливой и в случае, когда ток от внешнего источника замыкается на трубопровод с локальным повреждением изоляции.

Метод определения локальных повреждений изоляции в этом случае полностью аналогичен «градиентному методу», который широко применяется при наземном обследовании магистральных трубопроводов [8].

Рассмотрим возможность определения нарушения изоляционного покрытия трубопровода или оболочки кабеля, находящегося под слоем донного грунта на глубине h , посредством измерения параметров магнитного поля. Расчетная модель показана на рис.8, где плоскость XOY является поверхностью раздела вода-грунт. Удельная электрическая проводимость воды σ_2 , донного грунта - σ_1 . Ток I_1 , который наведен в трубопроводе, протекает вдоль оси X . На расстоянии a от нача-

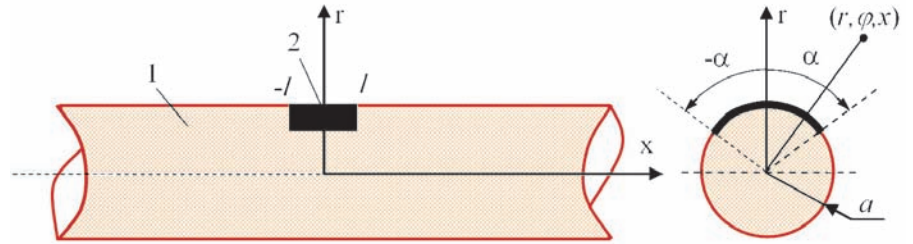


Рис.7. Модель для расчета электрического поля локального повреждения изоляции

ла координат часть тока I_2 стекает через повреждение в изоляции в грунт, а другая часть I_3 протекает далее вдоль оси X . При этом выполняется условие $I_1 = I_2 + I_3$.

Для расчета магнитного поля рассмотрим систему из двух бесконечных проводов с током I_1 и I_3 , а также одного полубесконечного провода с током I_2 и точечным электродом на конце. Расчет магнитного поля токов I_1 и I_3 выполняется по закону Био-Савара, а тока I_2 - по закону полного тока. Горизонтальные составляющие магнитной индукции от тока I_2 определяются по формулам:

$$B_x = -\frac{\mu_0 I_2 y}{4\pi [(x-a)^2 + y^2]} \left[1 + k_{12} - \frac{(1-k_{12})(z-h)}{\left[((x-a)^2 + y^2 + (z-h)^2) \right]^{3/2}} \right],$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I_2 (x-a)}{4\pi [(x-a)^2 + y^2]} \left[1 + k_{12} - \frac{(1-k_{12})(z-h)}{\left[((x-a)^2 + y^2 + (z-h)^2) \right]^{3/2}} \right],$$

где $k_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$ - коэффициент отражения относительно границы раздела вода-грунт.

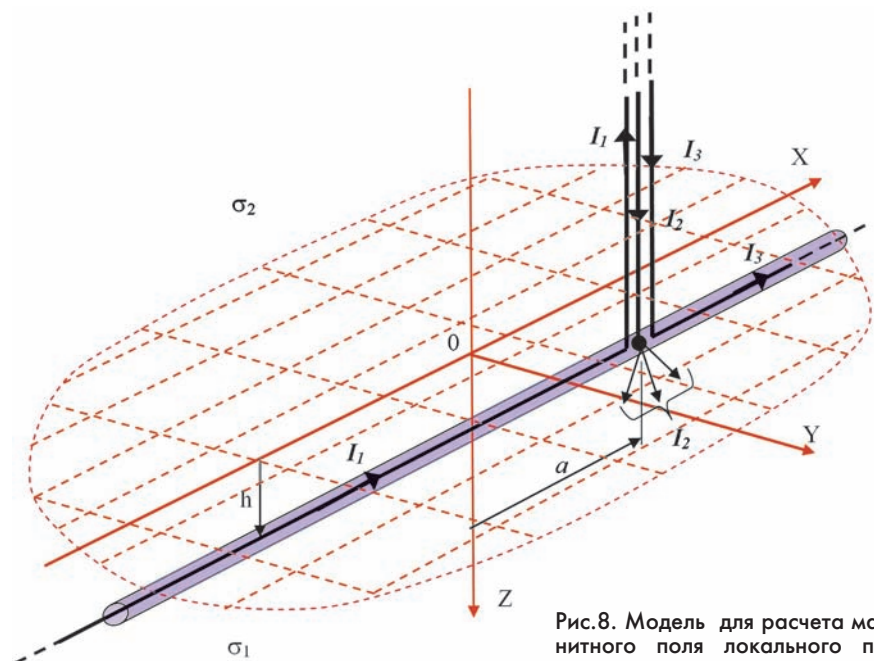


Рис.8. Модель для расчета магнитного поля локального повреждения изоляции

Пример 1. Для иллюстрации методов первой группы рассмотрим трубопровод из стальных труб, которые применялись для прокладки подводного участка газопровода по дну Черного моря - «Голубой поток». Внешний диаметр трубы 610 мм, толщина трубы 31,8 мм и относительная магнитная проницаемость $\mu = 200$ [10].

Так как подводная трасса трубопровода расположена преимущественно вдоль географического меридиана, его внешнее магнитное поле формируется в основном за счет вертикальной составляющей магнитного поля Земли (Z), средняя величина которой в районе российских территориальных вод составляет 41000 нТл.

Результаты расчета составляющих магнитного поля трубопровода при движении ПА с магнитометром поперек трубопровода на высоте 5 м представлены на рис.9. Для более высоких географических широт (например, районы Балтийского и северных морей) независимо от ориентации трубопровода вертикальная компонента магнитного поля Земли в несколько раз превышает горизонтальную. Для данных районов характер вторичного

магнитного поля трубопроводов будет аналогичен рис.9.

Как видно из данных рис.9, если намагничивание трубопровода формируется только за счет вертикальной компоненты магнитного поля Земли, для определения его местоположения достаточно при поперечном перемещении магнитометра (установленного на ПА) зафиксировать максимальное значение вертикальной составляющей вторичного магнитного поля (или зафиксировать момент смены знака у поперечной составляющей магнитного поля). Это соответствует нахождению магнитометра непосредственно над трубопроводом. Момент смены знака у вертикальной компоненты вторичного магнитного поля соответствует нахождению магнитометра на горизонтальной дистанции от трубопровода, равной вертикальной дистанции до него ($L=h$).

Пример 2. Для реализации методов второй группы при отслеживании трассы трубопровода приемно-излучающая система ПА должна быть построена таким образом, чтобы однозначно определять, с какой стороны от трубопровода находится ПА. Для этого в общем

случае необходим анализ сигналов со всех 4 измерительных преобразователей, размещенных в точках a, b, c и d (рис.4).

Однозначно определить нахождение ПА относительно трубопровода можно несколькими способами. Пусть в точках a, b, c и d измеряются модули напряженности переменного электрического поля $|E_a|, |E_b|, |E_c|, |E_d|$, созданного переменным электрическим током, протекающим вдоль трубопровода. Для того чтобы построить систему автоматического управления ПА, необходимо однозначно определять, в каком квадранте (1,2,3 или 4) находится ПА. Исходя из рис.10 это можно сделать в соответствии с табл. 1.

Из данных таблицы видно, что положение ПА определяется вполне просто и однозначно. Аналогичная картина будет и в случае измерения в точках a, b, c и d компонент напряженностей электрического E_x, E_y, E_z или магнитного B_x, B_y, B_z полей, а также модулей индукции магнитного поля $|B_a|, |B_b|, |B_c|, |B_d|$.

Пример 3. Оценим убывание тока, наведенного в трубопроводе неконтактным способом. Трубопровод находится в морской воде с $\sigma_B = 4 \text{ См/м}$, диаметр трубопровода $a = 0,5 \text{ м}$, диаметр изоляции $b = 0,55 \text{ м}$, удельная электрическая проводимость металла $\sigma_M = 10^7$, относительная магнитная проницаемость металла $\mu = 200$, удельная электрическая проводимость и относительная диэлектрическая проницаемость изоляции $\sigma_I = 10^{-6} \text{ См/м}$ и $\epsilon = 3$. Результаты расчета распределения нормированных значений тока, выполненных по формуле (10), представлены на рис. 11. Из данных рис.11 следует, что при реализации методов третьей группы частота источников магнитного или электрического типа должна быть не более 1000 Гц. Для практической реализации методов второй груп-

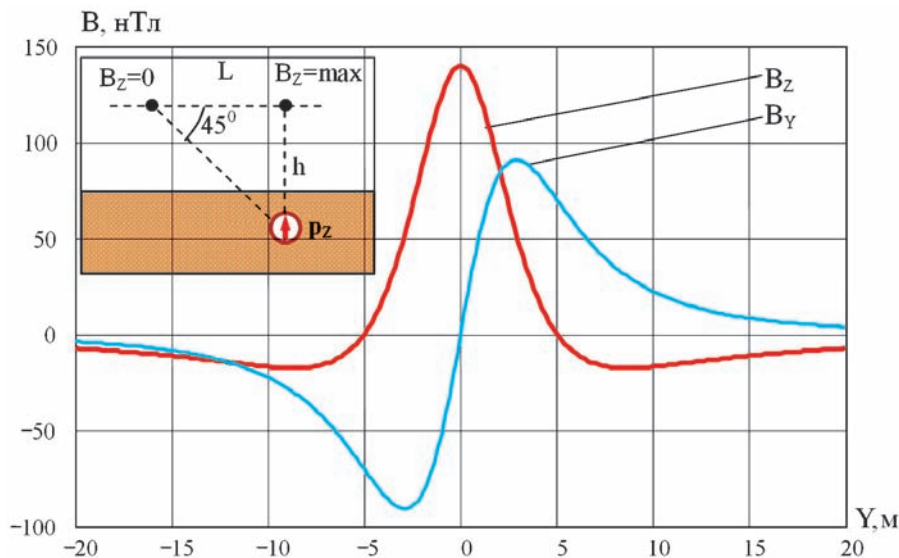


Рис.9. Собственное магнитное поле трубопровода

пы диапазон частот может быть 100-10000 Гц.

По формуле (8) найдем волновое сопротивление $Z_B = 12 \text{ Ом}$. Если источником ЭДС является электрический диполь с моментом $P_x = 200 \text{ А}\cdot\text{м}$ и частотой 10000 Гц, расположенный параллельно трубопроводу на расстоянии 2 м, то согласно (6) ЭДС равна 1,2 В, начальный ток (формула 7) равен 100 мА.

При реализации методов третьей группы расстояние между источником (магнитным или электрическим диполем) может быть минимально, а величина магнитного или электрического момента – значительной. Пусть возбуждение индукционного тока осуществляется магнитным диполем с моментом $M_z = 1000 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, расположенным на расстоянии 0,6 м от оси трубопровода. Тогда согласно (5) индуцированная ЭДС будет 2 В, а начальный ток $I(0) = 170 \text{ А}$.

Пример 4. Рассмотрим задачу определения угла между направлением движения ПА и осевой линией трубопровода в режиме отслеживания. Пусть на ПА установлена излучающая система электрического типа с продольной ориентацией электрического дипольного момента $P_{x'} = 100 \text{ А}\cdot\text{м}$ и частотой 5000 Гц. Для решения поставленной задачи будем использовать первичные преобразователи только с такими ориентациями измерительных осей, для которых первичное электромагнитное поле от излучающей антенны можно скомпенсировать геометрическим способом. С учетом структуры ЭМП электрического диполя для условий рис.12 такими компонентами будут:

для точки a - $B_{x'}, B_{y'}, B_{z'}$ и $E_{y'}, E_{z'}$; для точки b - $B_{x'}, B_{y'}, B_{z'}$ и $E_{y'}, E_{z'}$; для точки c - $B_{x'}, B_{y'}$ и $E_{y'}, E_{z'}$; для точки d - $B_{x'}, B_{y'}$ и $E_{y'}, E_{z'}$.

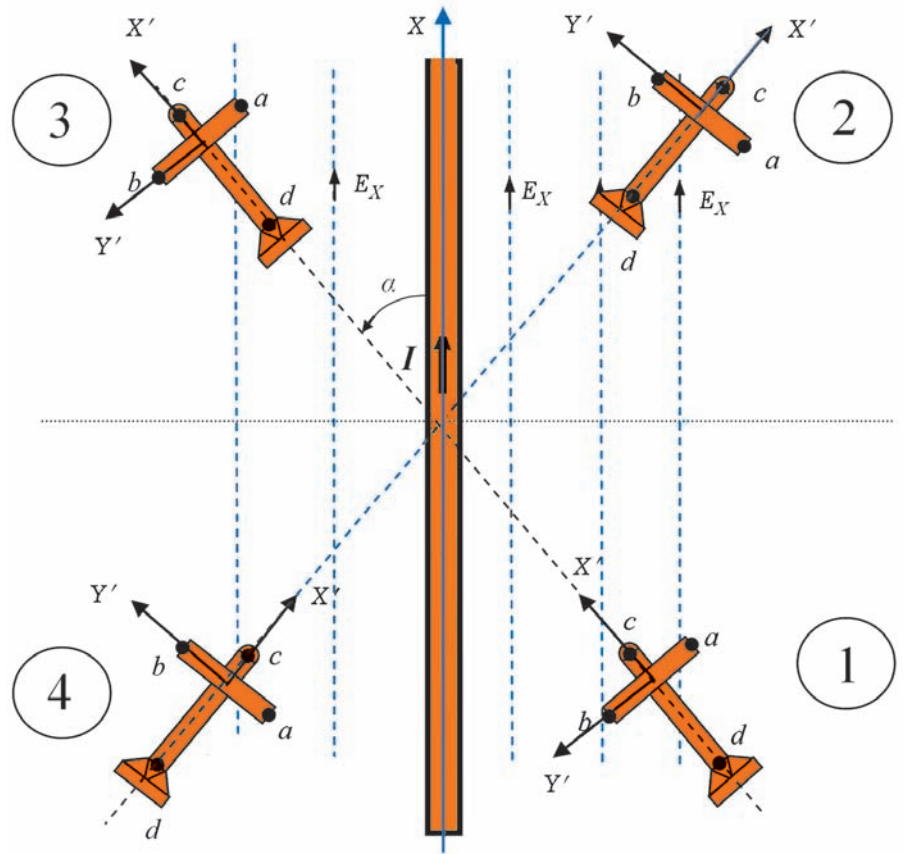


Рис. 10. К определению местоположения ПА относительно трубопровода

Таблица 1. К определению положения ПА относительно трубопровода

Номер квадранта	1	2	3	4
Соотношение между уровнями сигналов в точках a, b, c и d	$ E_a < E_b $ $ E_c > E_d $	$ E_a < E_b $ $ E_c < E_d $	$ E_a > E_b $ $ E_c < E_d $	$ E_a > E_b $ $ E_c < E_d $

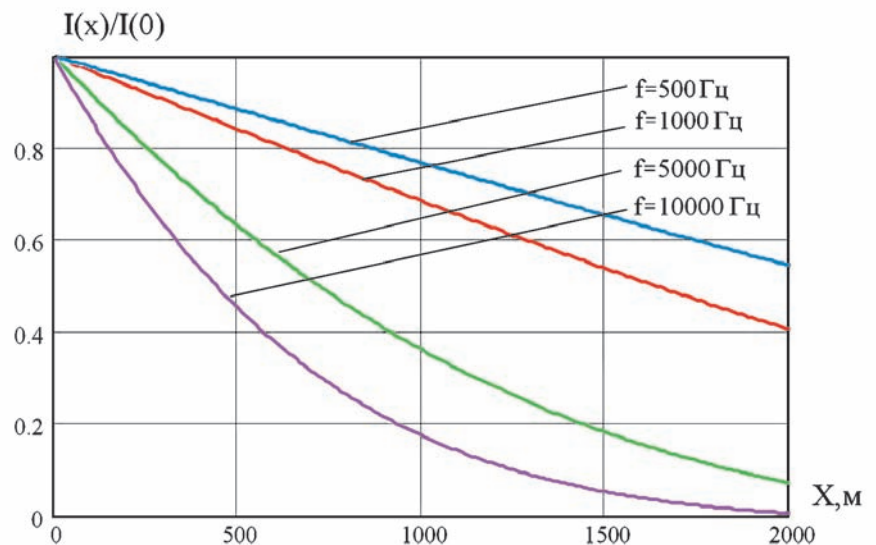


Рис.11. Зависимости нормированного индукционного тока в трубопроводе от продольной дистанции и частоты

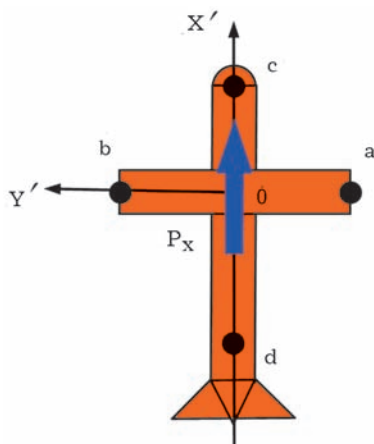


Рис.12. Схема расположения приемно-излучающей системы на ПА

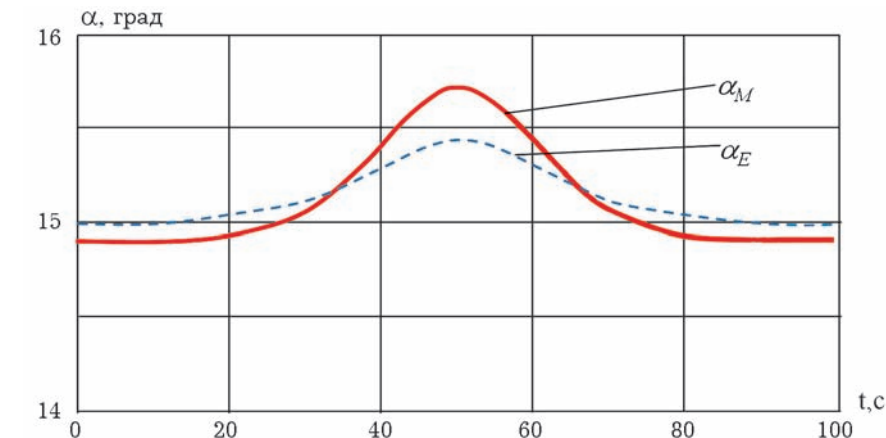
Пусть ПА перемещается со скоростью $v = 0,5$ м/с на высоте $h=3$ м и под углом $\alpha=15^\circ$ к оси трубопровода. Расстояние между точками $a-b$ и $c-d$ составляет 1м. ЭДС вычислялась по формуле (6), волновое сопротивление трубопровода принималось $Z_B=0,01$ Ом. Вторичное магнитное и электрическое поля рассчитывались по формулам (3) и (4). Для определения угла α достаточно в точках a, b, c и d иметь или 4 датчика напряженности электрического поля $E_{Y'}$, или 4 датчика индукции магнитного поля $B_{X'}$ (или $B_{Y'}$). По этим значениям легко вычислить модуль угла α по формулам:

$$\alpha_M = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \left(\frac{|B_{Y'}(c) - B_{Y'}(d)|}{|B_{Y'}(a) - B_{Y'}(b)|} \right),$$

$$\alpha_E = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \left(\frac{|E_{Y'}(c) - E_{Y'}(d)|}{|E_{Y'}(a) - E_{Y'}(b)|} \right).$$

Результаты расчета угла α представлены на рис.13. На 50-й секунде ПА пересекает ось трубопровода.

Из данных, представленных на рис.13, видно, что методическая погрешность данного способа определения угла между направлением движения ПА и осью трубопровода не превышает 1° . Отметим, что в форму-

Рис. 13. Точность определения угла α по данным измерения вторичного электромагнитного поля при движении ПА под углом $\alpha=15^\circ$ к оси трубопровода

ле для α_M вместо $B_{Y'}$ можно использовать данные измерений компоненты $B_{X'}$ в точках a, b, c и d . При этом зависимость α_M будет полностью аналогична рис.13.

Таким образом, совместно с результатами примера 3 полностью решается задача построения алгоритма навигации автономного необитаемого ПА для обеспечения режима отслеживания подводного трубопровода или кабеля.

Пример 5. Определим местоположение трубопровода относительно профиля дна с помощью ПА, имеющего двухкомпонентный магнитометр и навигационную привязку к географическим координатам Земли (режим обнаружения). После нахождения трубопровода, по которому протекает ток, созданный одним из рассмотренных ранее способов, ПА начинает ходить галсами перпендикулярно к оси трубопровода. При этом

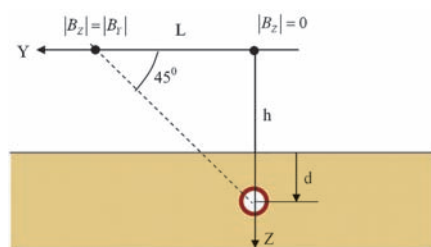


Рис.14. Определение заглубления трубопровода в донный грунт

магнитометром в координатах ПА измеряются вертикальная и продольная составляющие вторичного переменного магнитного поля. Во время прохождения над трубопроводом фиксируются два момента времени t_1 и t_2 . Момент времени t_1 соответствует условию $|B_z| = |B_y|$, а момент времени t_2 - условию $|B_z| = 0$ (рис.14).

Зная скорость движения ПА (v), легко находится расстояние $L = v(t_2 - t_1)$, которое равно вертикальной дистанции до оси трубопровода $L = h$. Зная расстояние ПА до дна, легко определяется заглубление трубопровода d .

Отметим, что данный способ аналогичен определению заглубления подземного трубопровода по данным измерений на поверхности Земли [8].

Пример 6. Рассмотрим определение локального повреждения изоляции посредством измерения параметров электрического поля с ПА, имеющего 2 контактных неполяризуемых измерительных электрода, разнесенных на расстояние 1м. ПА в режиме отслеживания перемещается вдоль трубопровода диаметром 0,5м на расстоянии от оси трубопровода 2м.

Трубопровод имеет локальное повреждение изоляции с размерами $l = 0,1$ м и $\alpha = 15^\circ$ (рис.7). Из локального повреж-

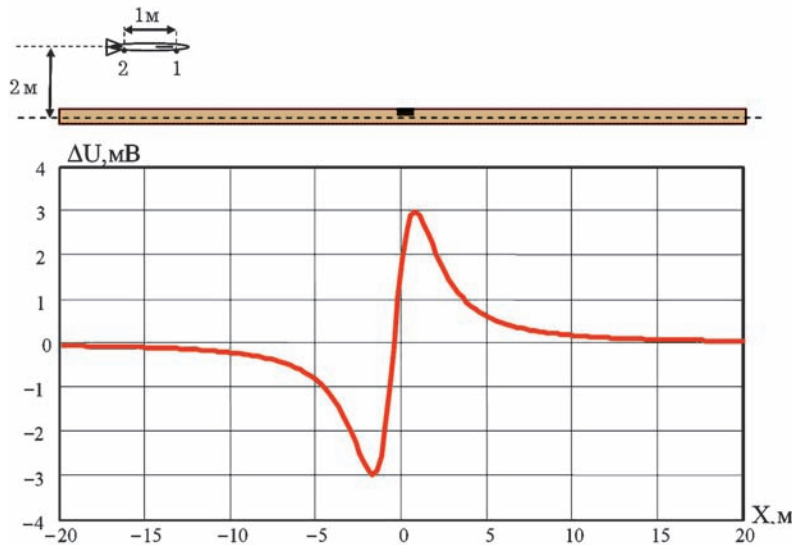


Рис.15. Определение локального повреждения изоляции посредством измерения потенциала постоянного электрического поля

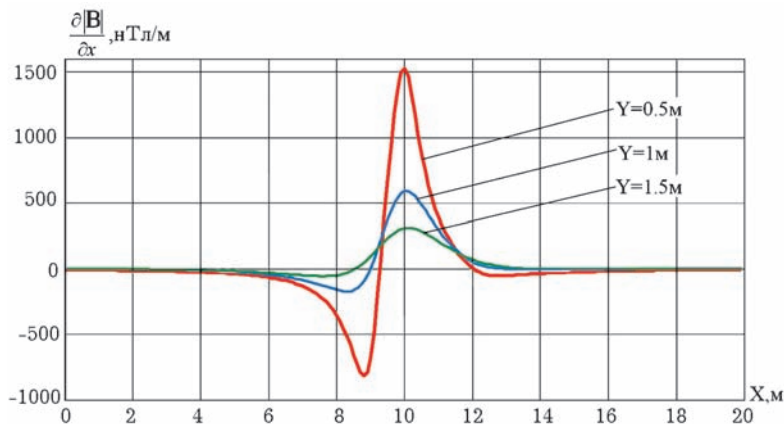


Рис.16. Распределение градиента модуля магнитной индукции над локальным повреждением изоляции трубопровода

дения изоляции вытекает (или втекает от катодной станции) ток силой 1А. Результаты расчета для $\Delta U = U_1 - U_2$, где U_1 и U_2 значения потенциалов на измерительных электродах 1 и 2, вычисленные по формуле (11), представлены на рис.15.

Из данных рис.15 видно, что измерение градиента электрического потенциала позволяет достаточно точно определить место повреждения изоляции трубопровода или кабеля.

Пример 7. Рассмотрим нахождение локального повреждения изоляции посредством измерения параметров магнитного поля с ПА. Пусть в трубопро-

вод или оболочку кабеля подан ток 10 А и половина тока (5 А) вытекает из локально поврежденной изоляции. Трубопровод заглублен в грунт на 1 м. ПА перемещается вдоль трубопровода на расстоянии 2 м от дна. Коэффициент отражения вода-грунт $k_{12} = 0,5$. Распределение градиента модуля индукции магнитного поля показано на рис.16 (повреждение изоляции находится в точке $X = 10$ м, а расчетная модель соответствует рис.8).

Из рис.16 видно, что место повреждения изоляции определяется достаточно точно для любых траверзных дистанций Y .

ВЫВОДЫ

Электромагнитные методы позволяют:

- определять координаты и вертикальное профилирование трассы трубопровода или кабеля относительно уровня морского дна;
- создать автоматическую систему отслеживания трассы подводного трубопровода или кабеля;
- дистанционно определять нарушения изоляционных покрытий трубопроводов и кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Ивлиев Е.А. Магнитные поля в морской среде: Учеб. пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2008. 135 с.
3. Калашников Н.И., Дудкин Ф.Л., Николаенко Ю.Б. Основы морской электроразведки. Киев: Наук. думка, 1980. 88 с.
4. Липатов В.В. Теорема взаимности для линейных цепей и сосредоточенных источников // Электричество. 1987. №8. С.28-30.
5. Уэйт Д. Электромагнитное излучение из цилиндрических систем. М.: Сов. радио, 1963. 240 с.
6. Корчагин Ю.А., Соломатов В.П., Чернов А.А. Радиосвязь в проводящих средах. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1990. 148 с.
7. Зимин Е. Ф., Качанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат. 1985. 256 с.
8. Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович В.В. и др. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. Киев: Наук. думка. 1988. 192 с.
9. Ивлиев Е.А., Иоссель Ю.Я. Обобщение метода средних потенциалов при расчете сопротивлений растеканию электродов // Электричество. 1986. №6. С.41-45.
10. Лушников Д.Л. "Голубой поток" – газопровод в Черном море // Подводные технологии и мир океана. 2005. №1. С.46-50.