

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИСКАТЕЛЯ ДОННЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**В.А. Герасимов, А.П. Катрушенков, В.В. Княжев,
А.В. Комлев, В.В. Лощенков, Н.А. Найденко**

При инспекции протяженных донных объектов перспективным решением является применение электромагнитного искателя (ЭМИ), установленного на подводном носителе, в частности, автономном необитаемом подводном аппарате (АНПА). В общем случае задачей ЭМИ является обнаружение донного объекта и формирование сигналов для управления носителем с целью отслеживания объекта. В статье предложена новая модель процесса взаимодействия ЭМИ с протяженным донным объектом как с изоляционным поверхностным покрытием, так и без него. Введено понятие объемного поля токов в проводящей среде в зоне излучения сигналов передающими диполями и определена связь между потенциалами на приемных диполях и физическими характеристиками внесенного в объемное поле токов протяженного донного объекта. Выполнено уточнение алгоритма функционирования ЭМИ, разработанного ранее в ИПМТ ДВО РАН, что позволило повысить точность определения угла пересечения курса АНПА с донным объектом. Предложена математическая модель процесса взаимодействия ЭМИ и донного объекта с контролем адекватности при взаимно дополняющих исследованиях математической модели и физической модели процесса взаимодействия в натуральных условиях на стенде. Полученные результаты убедительно подтверждают справедливость предложенной гипотезы о физической природе взаимодействия ЭМИ с донным объектом и адекватность разработанной математической модели. Это дает основу для создания полной математической модели комплекса «ЭМИ – АНПА» с целью построения и исследования алгоритмов управления АНПА в различных режимах отслеживания объекта.

Ключевые слова: протяженный донный объект, электромагнитный искатель, автономный необитаемый подводный аппарат, объемное поле токов, модель процесса взаимодействия, компьютерный и натуральный эксперимент.

Введение

Одним из перспективных направлений при проведении регулярной инспекции подводных коммуникационных сооружений большой протяженности (трубопроводов, кабельных линий) является применение электромагнитного искателя (ЭМИ), установленного на борту подводного носителя – АНПА. Выполненные ранее в ИПМТ ДВО РАН разработки этого устройства нуждаются в уточнении алгоритма работы и принятых схемотехнических решений с целью повышения точности вычислительных операций и расширения функциональности устройства.

Электромагнитный искатель представляет собой систему из передающих и приёмных диполь-

ных антенн, усилителей и устройства обработки данных. Как отмечается в [1], принцип действия ЭМИ основан на возбуждении электромагнитного поля в толще воды передающей дипольной антенной и измерении реакции окружающей среды на это поле при появлении в нем протяженного донного металлосодержащего объекта. При этом утверждается, что в этом объекте наводится соответствующий ток, который создает вторичное поле, регистрируемое приемными электродами ЭМИ. Конструкция и алгоритм функционирования ЭМИ обеспечивает формирование сигналов, с помощью которых должен определяться угол пересечения курса АНПА с продольной осью донного объекта [2].

Вместе с тем исследования ЭМИ, выполненные с целью совершенствования алгоритма расчетов и расширения функциональных свойств, показали, что принятый принцип действия нуждается в уточнении. Основой для такого вывода послужили исследования реакции ЭМИ на донный протяженный объект из изоляционного материала. Очевидно, в таком объекте под влиянием излучаемого электромагнитного поля ток наводиться не может. Тем не менее результаты показали, что сигналы ЭМИ изменяются при внесении в иницированное ЭМИ поле такого изоляционного объекта, при этом также получаются вполне адекватные значения угла пересечения курса носителя с продольной осью объекта. Было обнаружено также, что различимые сигналы появляются при увеличенном диаметре такого объекта по сравнению с металлическим объектом без изоляционного поверхностного покрытия.

Помимо этого к указанному несоответствию с принятым принципом действия добавляется тот факт, что ЭМИ работает только в электропроводной среде, например, в такой, как морская вода со средней электропроводностью, как правило, 4 См/м. В пресной воде сигналы с ЭМИ отсутствуют.

■ Основы взаимодействия ЭМИ и протяженного донного объекта

Указанные факторы дали основание сделать предположение о существенной роли других явлений и иной модели процесса взаимодействия ЭМИ с водной средой и с донным объектом, находящимся в зоне действия ЭМИ. Эта модель процесса основана на значительном влиянии не магнитного поля, а электрического поля в виде объемного поля токов между излучающими электродами, образующими передающий диполь. На рис. 1, а изображена графическая интерпретация объемного поля токов для одного диполя между передающими электродами А1 и В1 носителя ЭМИ в виде АНПА, при этом диполь расположен под углом γ к протяженному донному объекту ПО. Это поле токов в дискретной интерпретации можно представить как набор трубок тока, которые заполняют объем водной среды и соединяют передающие электроды. Если приемные электроды, образующие приемный диполь М1-Н1 в этом поле и выполняющие роль измерительных зондов, находятся в состоянии геометрической симметрии относительно передающего диполя, а в поперечном направ-

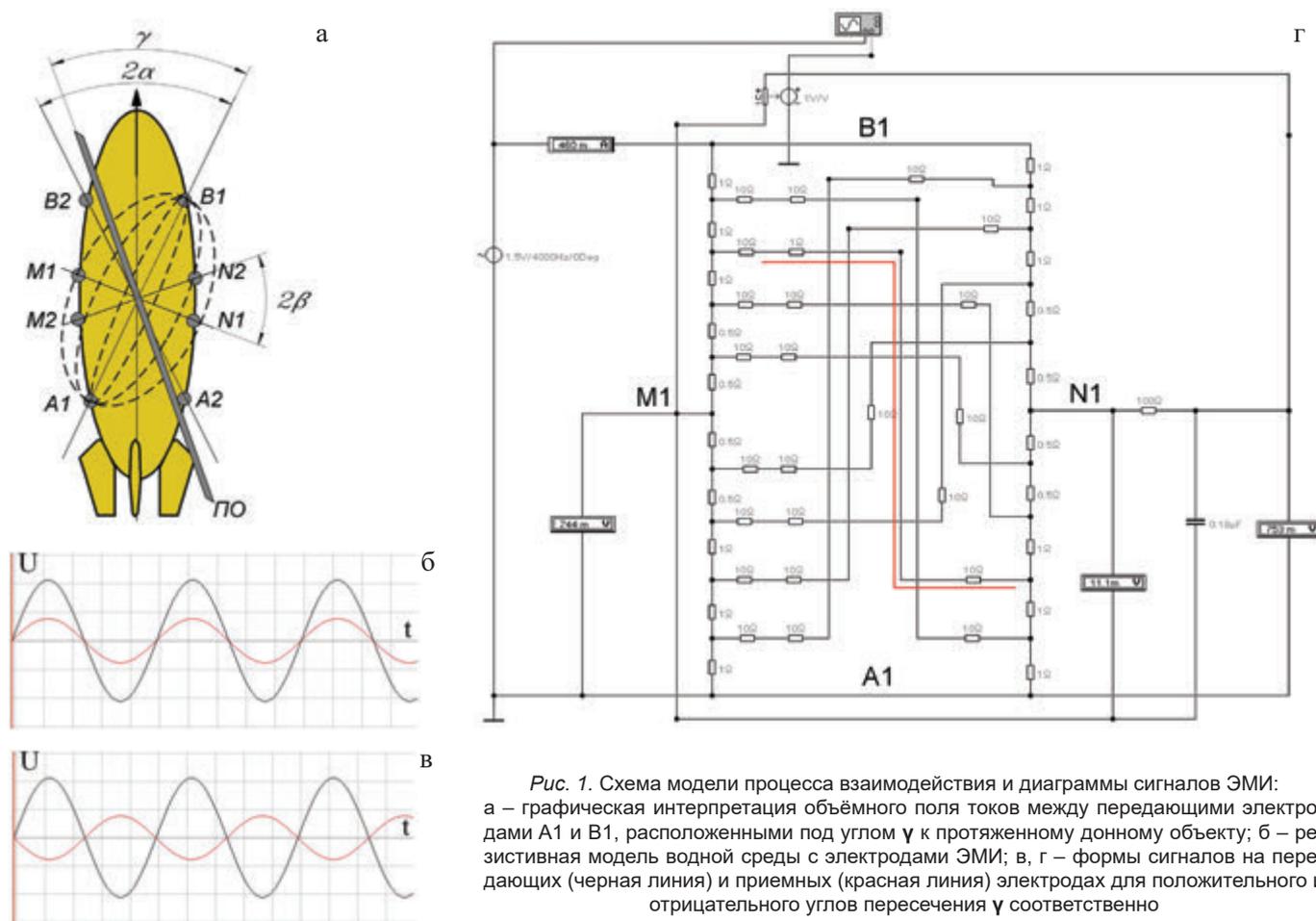


Рис. 1. Схема модели процесса взаимодействия ЭМИ: а – графическая интерпретация объёмного поля токов между передающими электродами А1 и В1, расположенными под углом γ к протяженному донному объекту; б – резистивная модель водной среды с электродами ЭМИ; в, г – формы сигналов на передающих (черная линия) и приемных (красная линия) электродах для положительного и отрицательного углов пересечения γ соответственно

лении какая-либо внешняя деформация объемного поля токов отсутствует, то на них должен быть одинаковый потенциал. В этом случае разность потенциалов на приемных электродах (т.е. выходной сигнал дипольной системы) будет равна нулю. Последнее утверждение будет справедливо, если на дипольную систему не оказывают влияния какие-либо предметы, расположенные несимметрично по бокам от дипольной системы.

Для оценки справедливости сделанного предположения была создана резистивная модель водной среды в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench, показанная на рис. 1, б.

Указанные выше трубки тока в водном объеме приняты в модели в виде всего двух симметричных параллельных трубок, каждая из которых моделируется цепочкой резисторов. Кроме этого введены дополнительные перекрестные резистивные связи, дополняющие картину объемных токов. Такая, предельно упрощенная, модель процесса тем не менее позволяет получить некоторую качественную картину изменения сигналов при введении деформации донным объектом в начальную симметрию поля и оценить применимость предложенной гипотезы.

Параметры настройки модели приняты соответствующими реальным значениям параметров схемы ЭМИ: напряжение на электродах передающего диполя А1-В1 равно 1,5 В, частота сигнала 4 кГц. Ток излучения установлен равным 460 мА, что соответствует определенному сопротивлению канала (трубки) тока. Значения сопротивлений продольных прямых каналов тока, а также поперечные перекрестные резистивные связи и значения их сопротивлений между продольными каналами прохождения тока приняты на эвристическом уровне из сложившегося понимания физической сути явлений. Последующие измерения подтвердили справедливость принятых решений.

Исследование предложенной выше резистивной модели процесса в дипольной системе, состоящей из двух передающих электродов А1-В1 и двух соответствующих приемных электродов М1-Н1, заключалось в последовательном изменении сопротивления одной из ветвей перекрестных связей. Это должно имитировать установку протяженного объекта в центре зоны расположения дипольной системы под определенным углом пересечения продольной оси донного объекта с проекцией на дно оси передающего диполя. Уменьшение сопротивления перекрестной связи соответствовало электропроводному подводному объекту, а увеличение сопротивления – изоляционному объекту. При этом положительному знаку угла пересечения соответствует взаимное расположе-

ние донного объекта и диполя, как показано на рис. 1, а, а на схеме модели – поперечная резистивная связь, подчеркнутая красным цветом (рис. 1, б). Каждому значению установленного угла пересечения соответствует определенный выходной сигнал в точках М1, Н1, соответствующих местам установки приемных электродов.

При некотором заданном входном синусоидальном сигнале на передающих электродах А1-В1 выходной сигнал на приемных электродах М1-Н1 будет также синусоидальный, как показано на рис. 1, в и г, причем фаза сигнала изменяется на 180 град. при изменении знака угла пересечения. Графики изменения действующего значения выходного сигнала в функции условного угла пересечения для электропроводного объекта, полученные в такой модели, показаны на рис. 2.

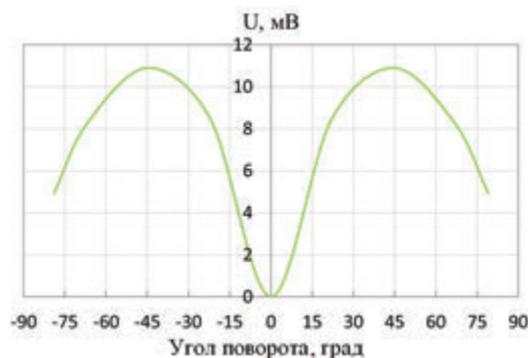


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала резистивной модели дипольной системы от угла пересечения

Для оценки адекватности сигналов в приведенной резистивной модели результатам взаимодействия ЭМИ с донным объектом в условиях, максимально приближенных к натурным, был создан специальный лабораторный стенд, представляющий собой бассейн с макетом носителя ЭМИ и реальным блоком электроники ЭМИ, изображенный на рис. 3. Бассейн имеет размеры $4 \times 2 \times 1,25$ м, заполнен водой на 1,05 м, а высота расположения дипольной системы на макете носителя составляет 0,8 м от дна бассейна.

Соленость воды в бассейне составляет 30 ‰, т.е. соответствует морской воде. Макет носителя ЭМИ представляет собой рамную конструкцию из изоляционного материала с установленными на ней электродами в виде двух дипольных систем, развернутыми относительно продольной оси макета носителя на ± 20 град. Принятые размерные соотношения дипольных систем ЭМИ близки к реальным, которые применяются в некоторых АНПА, например Клавесин (масштаб уменьшения составляет примерно 1 : 1,5).

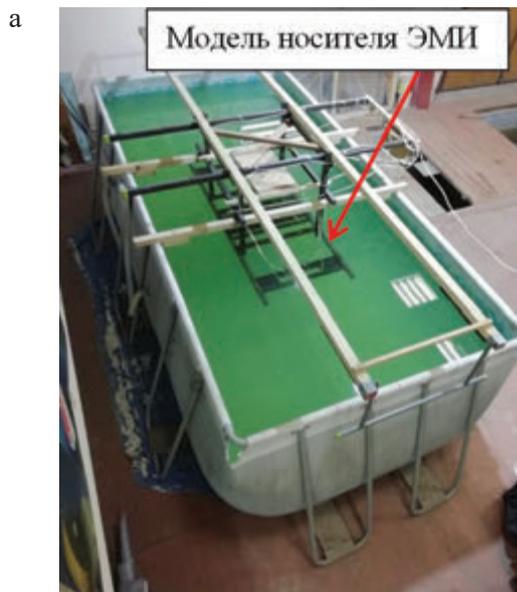


Рис. 3. Внешний вид лабораторного стенда для исследований ЭМИ: а – вид бассейна с моделью носителя ЭМИ; б – блок электроники ЭМИ

Электроды дипольных систем установлены на нижней части макета носителя и обращены активной поверхностью в сторону дна, при этом они подключены к соответствующим выводам блока электроники ЭМИ по стандартной рабочей схеме. Управление всей системой осуществлялось от технологического компьютера, соединенного с блоком электроники ЭМИ по интерфейсу Ethernet.

На стенде был поставлен специальный эксперимент для оценки адекватности резистивной модели, показанной на рис. 1. В этом эксперименте использовался только один диполь, в частности А1-В1, при отключенном диполе А2-В2, что обеспечивало эквивалентность лабораторного эксперимента и схемы резистивной модели. На дне бассейна в центре проекции выбранной дипольной системы устанавливался продольный объект в виде металлического прутка диаметром 10 мм. Угол пересечения оси прутка с продольной осью диполя последовательно изменялся в пределах от плюс 75 град до минус 75 град, при этом фиксировались значения сигнала на приемных электродах ЭМИ. Организация эксперимента позволяла устанавливать углы пересечения через 15 град с точностью ± 2 град. Здесь и далее под продольной осью диполя понимается проекция оси диполя на дно бассейна.

Результаты испытаний приведены на рис. 4. Сопоставление полученной зависимости с результатами измерений на рис. 2, полученными в резистивной компьютерной модели, показывает подобие в характере изменений сигналов. Отличие в значениях можно было бы устранить настройкой резистивной модели, но этот фактор в данном случае не является существенным. Неодинаковые ординаты экспе-

риментальной характеристики для положительных и отрицательных установленных углов пересечения объясняется несимметричным влиянием стенок бассейна, поскольку при симметричном расположении в бассейне макета носителя продольная ось исследуемой дипольной системы оказалась развернута вправо на угол 20 град. Главный итог – это практически полное совпадение характера изменения выходных сигналов в резистивной модели и результатов измерений на стенде, т.е. в натуральных условиях. Это подтверждает справедливость предложенной гипотезы о физической основе явлений, основанных на возникновении объемного электрического поля токов между передающими электродами и соответствующего взаимодействия этого поля с протяженным донным объектом.

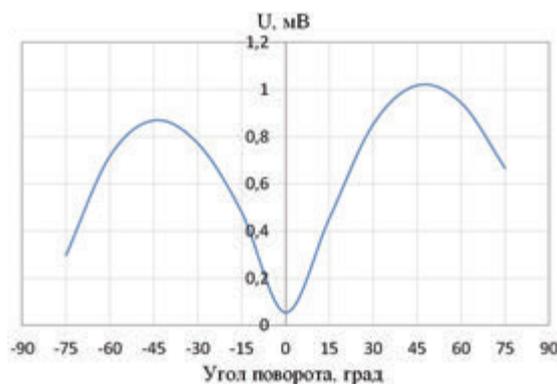


Рис. 4. Результаты экспериментальных измерений ЭМИ

Наглядная демонстрация приведенного вывода следует из рис. 5, где приведенные выше графики изменения сигналов ЭМИ в модели (рис. 2) и в эксперименте (рис. 4) показаны в одних координатах в относительных единицах, при этом за базу в каждом случае принято максимальное значение сигнала в модели или в эксперименте на стенде.

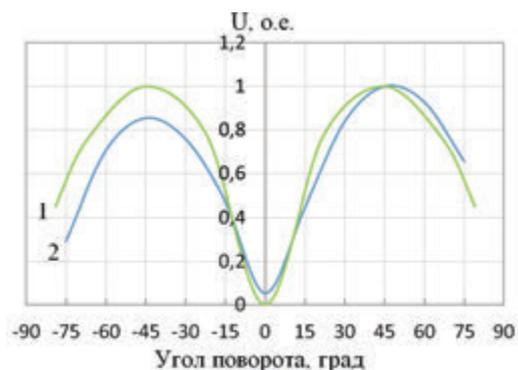


Рис. 5. Результаты экспериментальных измерений и моделирования ЭМИ в относительных единицах: 1 – измерения в резистивной модели; 2 – измерения на экспериментальном стенде

Некоторая асимметрия формы графика, полученного на стенде для положительных и отрицательных углов пересечения объекта с продольной осью диполя, является ожидаемой и объясняется влиянием боковых стенок бассейна. Вместе с тем график, соответствующий измерениям в резистивной модели, имеет симметричную форму, как и должно быть при отсутствии внешних факторов влияния на процесс.

Эксперимент на стенде и резистивная модель процесса взаимодействия дают также одинаковый характер изменения фазового сдвига между входным и выходным сигналами при изменении знака угла пересечения между осью установленного донного объекта и продольной осью передающего диполя. Это следует из сопоставления рис. 1, в и г, с рис. 6, а и б соответственно, что дополнительно подтверждает принятую гипотезу.

Адекватная реакция ЭМИ также следует, если в зону действия дипольной системы внести объект из изоляционного материала. Однако достоверно различимый сигнал на приемных электродах ЭМИ для такого объекта появляется при его увеличенных разме-

рах по сравнению с электропроводным объектом без изоляционного поверхностного покрытия, что будет показано ниже.

■ Эксперименты с электроизоляционным донным объектом

Для определения результатов взаимодействия изоляционного объекта с объемным полем токов в воде была поставлена серия экспериментов, в которых в качестве донного протяженного объекта использовалась пластиковая труба диаметром 110 мм и длиной 2 м. Исследовались деформации объемного поля токов, вызванные изолированным объектом как за счет замещения этим объектом соответствующего объема воды в зоне дипольной системы, так и за счет уменьшения сечения пути для объемного тока – т.е. появления эффекта «перегораживания» сечения.

Изоляционный объект располагался на дне в центре проекции дипольной системы. Последовательно изменялся угол пересечения оси объекта с проекцией на дно бассейна продольной оси дипольной системы в пределах от плюс 65 град до минус 25 град и фиксировались значения сигнала на приемных электродах с помощью ЭМИ. Приведенные ограничения углов объясняются фактическими соотношениями между размерами трубы и бассейна. Для погружения трубы на дно использовались неметаллические грузы, расположенные внутри трубы, при этом торцы трубы закрывались изоляционными заглушками.

Серия экспериментов включала в себя опыты, выполненные со следующими донными объектами, составленными из пластиковых труб.

1. Опыт с одной пластиковой трубой, расположенной на дне.
2. Опыт с одной пластиковой трубой, поднятой над дном на высоту 110 мм.

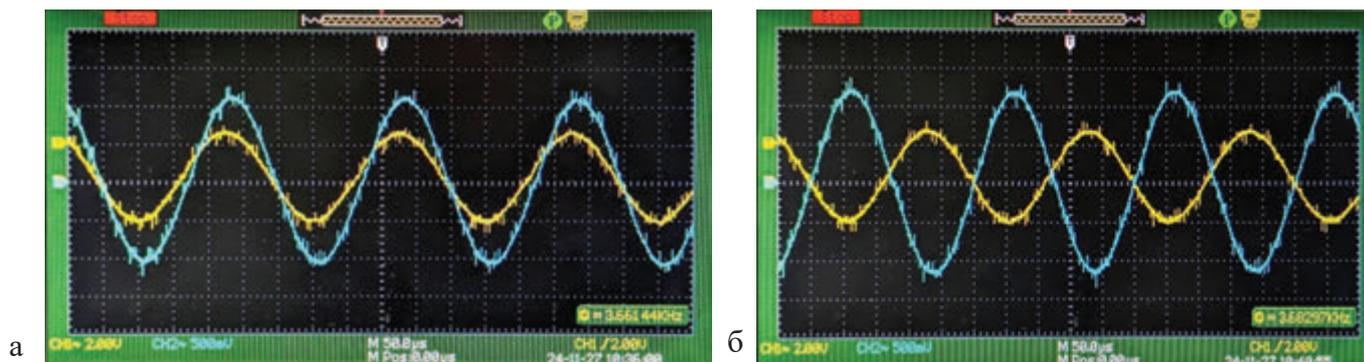


Рис. 6. Входной (голубая линия) и выходной сигналы одиночной дипольной системы ЭМИ при изменении знака угла пересечения протяженного донного объекта и оси передающего диполя: а – положительный угол пересечения; б – отрицательный угол пересечения

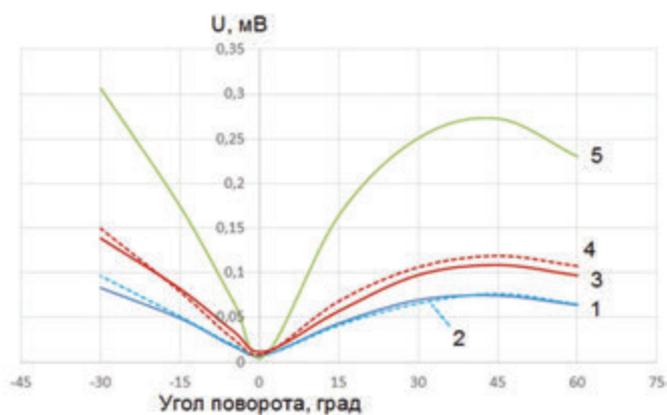


Рис. 7. Результаты измерения напряжения на приёмных электродах ЭМИ от угла поворота донных изолированных протяженных объектов, составленных из труб диаметром 110 мм: 1 – одна труба на дне; 2 – одна труба на высоте 110 мм от дна; 3 – две трубы на дне рядом друг с другом по горизонтали; 4 – две трубы рядом друг с другом по горизонтали на высоте 110 мм; 5 – две трубы на дне, расположенные рядом друг с другом по вертикали

3. Опыт с двумя одинаковыми пластиковыми трубами, расположенными на дне рядом друг с другом по горизонтали.

4. Опыт с двумя одинаковыми пластиковыми трубами, расположенными на дне рядом друг с другом по горизонтали и поднятыми над дном на высоту 110 мм.

5. Опыт с двумя одинаковыми пластиковыми трубами, расположенными на дне рядом друг с другом по вертикали.

На рис. 7 представлены значения сигнала ЭМИ (действующее значение напряжения на приёмных электродах) в зависимости от угла поворота донного объекта относительно оси дипольной системы для указанной серии экспериментов.

В результате анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1) форма изменения сигнала ЭМИ подобна аналогичному графику для проводящего объекта (рис. 4), что говорит об общей природе явления;

2) измеренное действующее значение сигнала ЭМИ для изолированного объекта значительно меньше, чем для проводящего объекта, при этом размер изолированного объекта существенно больше электропроводящего;

3) преобладающее влияние на сигнал ЭМИ для изолированного объекта оказывает «перегораживание» сечения объемного поля токов на соответствующих участках силовых линий поля; влияние замещения вытесненной воды объемом изолированного объекта с соответствующей проводимостью оказывает меньшую роль.

Для того чтобы подтвердить третий вывод, был поставлен и выполнен эксперимент с тонким (толщина 8 мм) пластиковым листом длиной 2 м и шириной 120 мм, т.е. с площадью, близкой к значению продольного диаметрального сечения пластиковой трубы. Очевидно, что такой объект оказывает различное влияние на размер сечения пути токов в объемном поле в зависимости от его вертикальной или горизонтальной ориентации при неизменном объеме вытесненной воды.

В ходе эксперимента пластиковый лист располагали на дне горизонтально и на ребро под разными углами относительно продольной оси дипольной системы ЭМИ (рис. 8, а). В результате при расположении листа на дне плашмя сигнал на приёмных электродах ЭМИ практически отсутствовал и был на уровне шума. Для вертикального расположения листа сигнал имел существенное значение, однозначно идентифицируя угол пересечения. Такой эксперимент убедительно подтверждает основное влияние эффек-

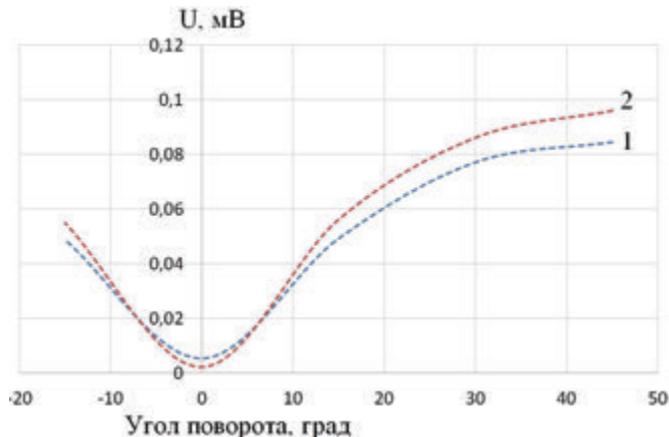


Рис. 8. Результаты измерения сигналов на приемных электродах ЭМИ на экспериментальном стенде для изоляционных объектов: а – установка пластикового листа в бассейне; б – зависимость напряжение на приёмных электродах ЭМИ от угла поворота для изоляционной трубы (1) и листа (2), поставленного на ребро

та «перегораживания» поля на сигналы ЭМИ. На рис. 8, б представлено сравнение экспериментальных данных для пластиковой трубы и пластикового листа, установленного на ребро. Как видно из графиков, они практически идентичны, что подтверждает ранее высказанное предположение о наличии эффекта «перегораживания» объемного поля токов поперечным сечением донного объекта и соответствующего уменьшения сечения силовых линий поля токов в объеме воды между электродами в зоне расположения объекта. При близких значениях поперечного сечения изоляционные объекты в виде листа и трубы оказывают практически одинаковое воздействие на поле токов, что указывает на преобладание эффекта «перегораживания», т.к. для листа объем вытесненной воды на несколько порядков меньше, чем для трубы.

Исходя из полученных экспериментальных результатов, можно заключить, что взаимодействие ЭМИ с донным объектом, находящимся в зоне действия ЭМИ, основано на деформациях объемного поля токов в воде. При этом имеют место два фактора: первый – это изменение проводимости в поле токов за счет замещения некоторого объема поля объемом внесенного объекта со своей проводимостью, отличной от проводимости окружающей воды. Второй фактор, влияющий на деформацию поля – это явление «перегораживания» сечения пути для объемного тока на соответствующих участках, что приводит к изменению проводимости.

Проводящий объект в этом поле за счет его высокой проводимости приводит к существенному уменьшению сопротивления в объеме воды вдоль этого объекта и созданию альтернативного маршрута прохождения тока между электродами. Эффект от изменения сечения пути для токов здесь пренебрежимо мал и не оказывает заметного влияния на сигналы ЭМИ.

Для изоляционного объекта существенными являются два указанных фактора, причем влияние уменьшения сечения объемного поля за счет «перегораживания» этим объектом пути для тока оказывается более существенным, что показано на рис. 8, б.

Указанные эффекты наглядно иллюстрируются также на резистивной модели процесса взаимодействия ЭМИ, показанной на рис. 1, б. Проводящему объекту соответствует уменьшение сопротивления поперечной связи, имитирующей ориентацию объекта в зоне дипольной системы. Изоляционный объект отображается увеличением сопротивления соответствующей поперечной связи, при этом эффект «перегораживания» сечения в поле токов имитируется увеличением сопротивления продольных участков распределенного резистора, заключенных между каждым из передающих диполей и объектом.

■ Математическое моделирование процесса взаимодействия ЭМИ с донным объектом

Развитие дальнейших исследований было направлено на создание математической модели процесса взаимодействия поля токов, создаваемого ЭМИ, с вносимым в это поле некоторым протяженным объектом. При этом объект может быть как металлодержающим с изоляционным покрытием или без него, так и изоляционным без содержания металла. Такая модель, дополненная математической моделью носителя, должна позволить проводить исследования и оптимизацию параметров ЭМИ при обнаружении донного протяженного объекта, а также осуществлять построение и исследование алгоритмов управления носителем ЭМИ в режиме отслеживания, т.е. при движении вдоль этого объекта. Учитывая значительную затратность и трудоемкость проведения натурных исследований ЭМИ, указанная постановка задачи представляется весьма актуальной.

Как известно, одним из первых и важных вопросов, сопровождающих создание математической модели, является оценка ее адекватности реальному объекту. Постановка такой задачи в нашем случае принята в виде совместных взаимно дополняющих исследований: на экспериментальном стенде, в условиях протекания процесса взаимодействия, максимально близких к натурным, и на математической модели с последующим их сопоставлением при одинаковых исходных данных для натурных измерений на стенде и для модели. В качестве меры ошибки принята линейная функция [3]:

$$f[y_o - y_M] = \Delta(x), \quad (1)$$

где y_o, y_M – выходные переменные реального объекта и модели соответственно при согласованных входных воздействиях x . В качестве критерия адекватности используется выражение:

$$f[y_o - y_M] < \Delta_{\text{доп.}} \text{ при } x_{\text{мин.}} < x < x_{\text{макс.}} \quad (2)$$

Такое решение можно считать рациональным, поскольку основным назначением ЭМИ является функционирование как датчика угла рассогласования между направлением движения носителя и продольной осью протяженного донного объекта с последующим использованием этого сигнала для управления носителем с целью отслеживания трассы прокладки объекта. Здесь важным является именно абсолютное, а не относительное полученное значение ошибки управления курсом носителя.

Разработка математической модели на данном этапе исследования является альтернативой анали-

тическому описанию процесса взаимодействия подводного объекта с объемным полем токов, которое представляется достаточно сложным и требующим определенных допущений, что неизбежно будет сказываться на точности результатов.

При постановке задачи математического моделирования проводилась предварительная оценка применимости программ, предназначенных для решения задач с дифференциальными и интегральными уравнениями методом конечных элементов, например, известных программ для моделирования физических процессов, таких как ANSYS Maxwell 3D и COMSOL Multiphysics. Расчет в этих программах выполняется в графической форме и сводится к заданию геометрии модели и свойств материалов объектов среды, а также заданию граничных условий. Исходя из анализа полученных пробных результатов моделирования и степени их соответствия экспериментальным данным, а также требуемых временных затрат на решение поставленных задач, для исследования была выбрана программа COMSOL Multiphysics.

Схема моделирования максимально повторяла условия эксперимента на лабораторном стенде (см. рис. 3), т.е. параметры среды и геометрические размеры дипольной системы, а также ее электрические параметры соответствовали условиям стенда. На приемных электродах измерялась разница потенциалов при повороте донного протяженного объекта. Так, на рис. 9 представлена схема моделирования в программе COMSOL напряженности электрического поля в морской воде для протяженного объекта из непроводящего материала, расположенного под некоторым углом пересечения с продольной осью дипольной системы. Компьютерный эксперимент заключался в измерении разницы потенциалов на приемных электродах для различных установленных углов пересечения в таком же диапазоне, как и в экс-

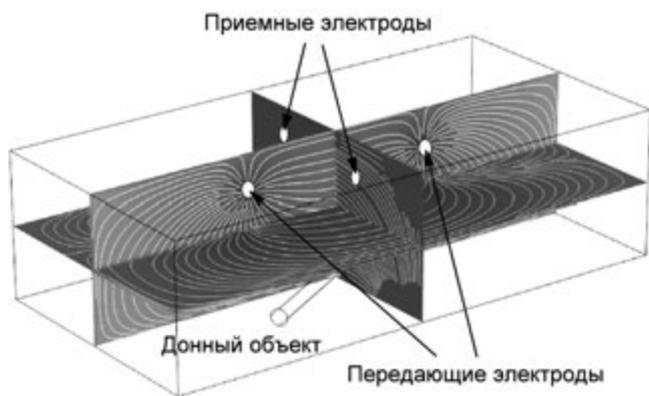


Рис. 9. Моделирование напряженности электрического поля в морской воде в программе COMSOL Multiphysics

периментах на стенде. При этом выдерживались максимально возможные совпадения исходных данных для моделирования и условий проведения натурального эксперимента.

На рис. 10 представлены сравнительные результаты моделирования в программе COMSOL и экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде, как пример – для изоляционного объекта в виде пластиковой трубы. Результаты моделирования дают качественное совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность и применимость модели для дальнейших исследований. Применение предложенного критерия адекватности будет показано ниже, при оценке качества функционирования модели ЭМИ как измерителя угла пересечения курса носителя с продольной осью протяженного объекта.

Математическая модель дает широкие возможности для изучения явлений, сопровождающих взаимо-

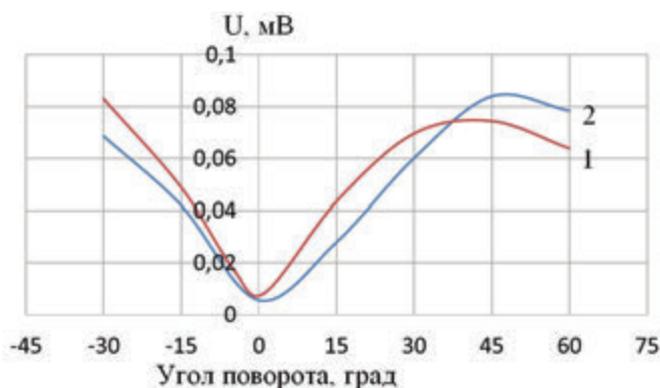


Рис. 10. Результаты экспериментальных измерений (кривая 1) и моделирования в программе COMSOL (кривая 2) донного объекта в виде пластиковой трубы

действие ЭМИ с протяженными донными объектами. На рис. 11 приведены результаты компьютерных экспериментов с плоскими изоляционными и электропроводными объектами с одинаковой длиной 2 м и различной шириной: 60 мм, 120 и 180 мм для каждого объекта.

Из графиков на рис. 11 следует, что для изоляционного объекта преобладающим фактором, влияющим на реакцию ЭМИ, является эффект уменьшения поперечного сечения пути для тока в объемном поле (эффект «перегораживания»), обусловленный вертикальными размерами объекта. Для электропроводного объекта основным является эффект шунтирования в объемном поле токов по направлению ориентации объекта. Численные значения сигналов, показанные на рис. 11, подтверждают этот вывод.

Представляет интерес изменение выходного сигнала ЭМИ при обнаружении донного металлосоде-

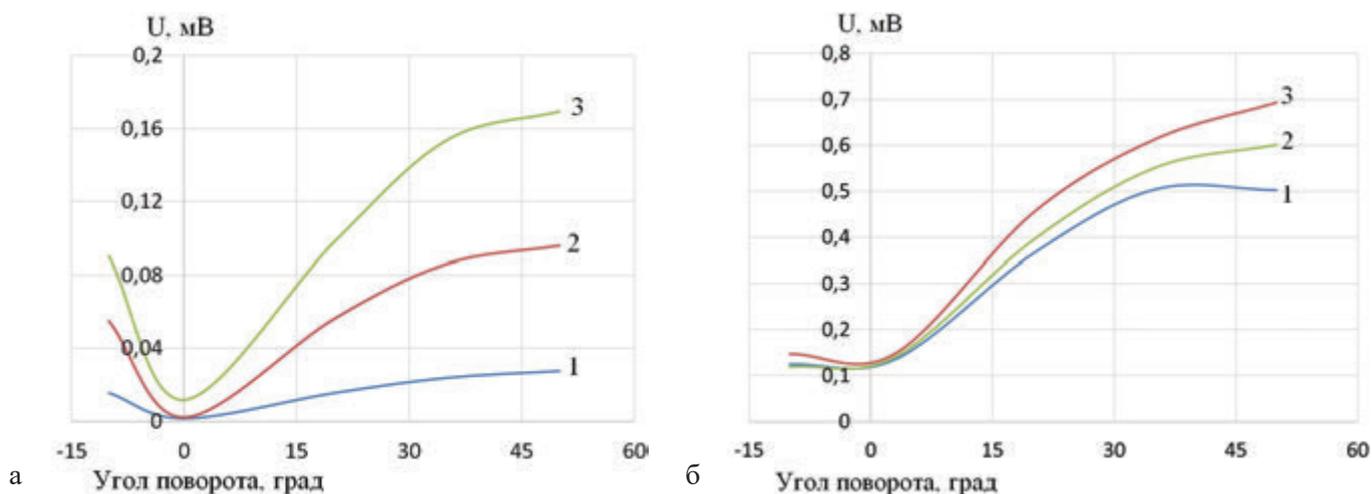


Рис. 11. Сигналы ЭМИ для донных объектов: а – изоляционные листы длиной 2 м и шириной 60 мм, 120, 180 мм, установленные вертикально, – графики 1, 2, 3 соответственно; б – электропроводный лист длиной 2 м и шириной 60 мм (вертикально), 120 (горизонтально), 120 мм (вертикально), – графики 1, 2, 3 соответственно

жащего объекта с поверхностным изоляционным покрытием и без него. Эксперименты, отвечающие на этот вопрос, были организованы следующим образом. Два вида донных объектов для исследований создавались с использованием тонкостенных изоляционных труб диаметром 50 и 110 мм и длиной 1,6 м. Металлическое заполнение выполнялось в виде связки пяти отрезков кабель-троса КГ-7 длиной 1,5 м, которые могут помещаться внутрь каждой из труб. Кабель-трос не имеет поверхностного изоляционного покрытия, и его диаметр составляет 14 мм. Измерения проводились для трех видов донных объектов с использованием труб диаметром 50 и 110 мм для каждого вида:

- объект состоит из связки пяти отрезков кабель-троса;
- объект представлен изоляционной трубой без металлического заполнения;
- объект представлен изоляционной трубой с металлом внутри в виде связки пяти отрезков кабель-троса.

Донный объект размещался на дне бассейна, и последовательно через 15 град устанавливался угол пересечения оси объекта с продольной центральной осью бассейна в пределах от плюс 75 град до минус 75 град. При этом регистрировалось напряжение на приемных электродах ЭМИ, а полученные графики изменения напряжения в зависимости от установленного угла пересечения для этих случаев показаны на рис. 12. Измерения проводились для одной выделенной дипольной системы ЭМИ, состоящей из передающего диполя с электродами А1-В1 и приемного диполя с электродами М1-Н1, причем продольная ось передающего диполя была установлена вдоль

продольной центральной оси бассейна, т.е. влияние стенок бассейна на результаты измерения было симметричным.

Вместе с тем были выполнены аналогичные компьютерные эксперименты на указанной выше математической модели процесса взаимодействия ЭМИ с донным объектом в морской воде. Полученные результаты приведены на рис. 13. Исследования заключались в определении значений напряжения на приемных электродах модели дипольной системы (см. рис. 9) в зависимости от угла пересечения донного

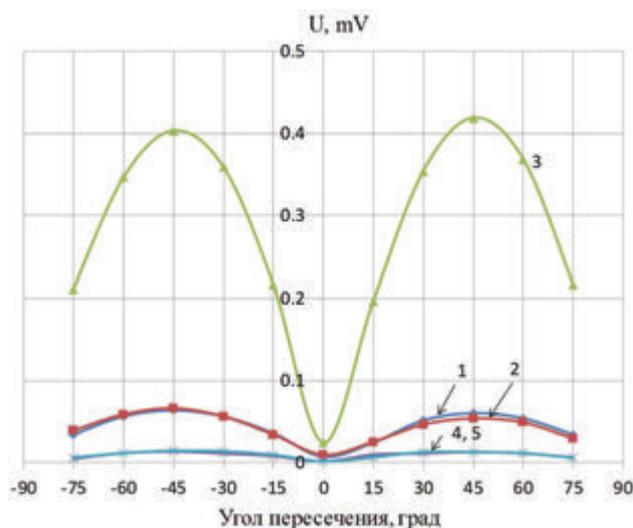


Рис. 12. Экспериментальные зависимости сигнала U на приемном диполе ЭМИ для донных объектов с использованием изоляционных труб в зависимости от угла пересечения объекта с продольной осью передающего диполя: 1 – труба диаметром 110 мм с металлически заполнением; 2 – труба 110 мм без металла внутри; 3 – отдельная связка пяти отрезков кабель-троса КГ-7 без изоляционного покрытия; 4, 5 – труба 50 мм с металлом и без металла внутри соответственно

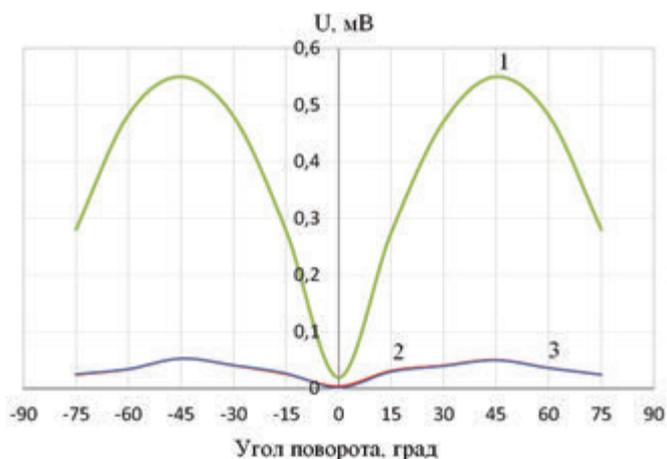


Рис. 13. Результаты математического моделирования для определения зависимости сигнала U на приемном диполе ЭМИ от установленного угла пересечения донного объекта с продольной осью передающего диполя: 1 – металлический объект без поверхностного изоляционного покрытия; 2, 3 – металлический объект внутри изоляционной трубы диаметром 110 мм и отдельно изоляционная труба диаметром 110 мм без металлического заполнения внутри соответственно

объекта с проекцией продольной оси передающего диполя на дно бассейна. Здесь, как и ранее, аналогия заключалась в поддержании максимально близкого совпадения между условиями натуральных экспериментальных исследований и компьютерного эксперимента. Сопоставляя рисунки 12 и 13, можно отметить достаточно хорошее совпадение свойств модели с процессами в реальных условиях, что является еще одним дополнительным свидетельством достоверности предложенной модели процесса взаимодействия.

Анализ полученных экспериментальных результатов взаимодействия ЭМИ и металлосодержашего объекта с поверхностной изоляцией позволяет сделать следующие выводы:

- изоляционное поверхностное покрытие металлического объекта практически исключает его свойства как проводника в зоне обнаружения донных объектов с помощью ЭМИ;
- эффект от наведенных токов в металлическом объекте и влияние их на дипольную систему ЭМИ можно считать пренебрежимо малым;
- реакция ЭМИ на объект с поверхностной электроизоляцией пропорциональна поперечному сечению вдоль объекта, т.е. эффекту «перегораживания» сечения пути для токов в объемном поле.

Формы графиков изменения сигналов в зависимости от угла пересечения в натурном эксперименте и в модели полностью идентичны. Значения сигналов на приемном диполе ЭМИ для изоляционного донного объекта определяются, при прочих равных условиях, его поперечными размерами. Так, для объекта в виде изоляционной трубы диаметром 50 мм максималь-

ный сигнал составляет примерно 15 ... 20 мВ, тогда как для изоляционной трубы диаметром 110 мм этот сигнал достигает значения 60 ... 70 мВ. При этом размещение внутри трубы металлического наполнения практически не оказывает влияния на значения сигналов. Реакция ЭМИ на проводящий металлический объект оказывается существенно больше, чем на изоляционный, и в условиях проводимого эксперимента полученное максимальное значение сигнала достигало 0,4 В.

Таким образом, можно считать, что предложенная выше гипотеза о процессах взаимодействия ЭМИ с водной средой и с донным объектом, находящимся в зоне действия ЭМИ, полностью подтверждается и такое взаимодействие заключается в следующем.

При подаче напряжения на передающие электроды между ними через проводящую среду (воду) протекает ток в соответствии с сопротивлением этой среды, образуя тем самым объемное поле токов. До внесения объекта это поле токов симметрично относительно продольной оси аппарата и потенциалы на приемных электродах одинаковы, т.е. сигналы ЭМИ минимальны.

Внесение проводящего объекта в это поле за счет его высокой проводимости приводит к существенно уменьшению сопротивления в объеме воды вдоль этого объекта и созданию альтернативного маршрута прохождения тока между передающими электродами. Это приводит к деформации объемного поля токов и возникновению разности потенциалов на приемных электродах, т.е. возникает определенная реакция на внесенный в зону ЭМИ объект

При внесении в зону ЭМИ изоляционного объекта на деформацию поля токов и, соответственно, на потенциалы на приемных электродах оказывают влияние два фактора: первый – это вытеснение этим объектом соответствующего объема воды с заменой его нулевой проводимостью и второй фактор – уменьшение сечения объемного поля на соответствующих участках. Это происходит за счет «перегораживания» этим объектом пути для тока, причем это влияние оказывается более существенным, что показано на рис. 8, б.

Эти два фактора, разумеется, сказываются и при нахождении в поле токов проводящего объекта, однако здесь влияние уменьшения сечения пути для токов в объемном поле значительно меньше, чем увеличение проводимости в объемном поле по направлению расположения такого объекта, и не оказывает заметного влияния на сигналы ЭМИ.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора математического аппарата при постанов-

ке задачи получения аналитического описания процессов взаимодействия ЭМИ с протяженным донным объектом как с изоляционным поверхностным покрытием, так и без него, что может быть использовано для построения обобщенной математической модели полного комплекса, включая модель ЭМИ и модель носителя, например, АНПА. Такое решение должно предоставить возможность исследования и разработки алгоритмов управления носителем при различных требованиях к процессу управления: отслеживание трассы прокладки донного объекта с минимальной амплитудой колебаний по курсу движения, или, например, обеспечение управления носителем при отслеживании донного объекта с движением параллельно трассе прокладки объекта на заданном отстоянии от нее.

Вместе с тем достигнутые аппаратные и программные решения, реализованные в блоке электроники ЭМИ для ряда проектов и оформленные как патенты РФ [4, 5], позволяют использовать это устройство в качестве датчика обнаружения донного объекта и определения угла пересечения с продольной осью объекта. Полученное значение угла пересечения как сигнала рассогласования может быть использовано для решения каких-либо ограниченных задач управления носителем ЭМИ.

■ Определение угла пересечения курса носителя ЭМИ с продольной осью донного объекта

Выполненные выше исследования были проведены для простой дипольной системы, состоящей из двух передающих и двух приемных электродов. Дипольная система, реализованная в составе ЭМИ, конструктивно состоит из двух таких систем, развернутых относительно продольной оси носителя на угол $\pm \alpha$ (см. рис. 1, а). Алгоритм работы ЭМИ предусматривает необходимые коммутации в блоке электроники, и при этом формируются три излучающих электрических диполя и, соответственно, три приемных диполя. Первый передающий диполь образуется электродами А1-В1, а соответствующий ему приемный диполь – электродами М1-Н1; второй передающий диполь – электродами А2-В2, а его приемный диполь – электродами М2-Н2. При этом оси первого и второго излучающих диполей повернуты на угол $\pm \alpha$ относительно продольной оси носителя. В общем случае оси приемных диполей могут быть развернуты на угол $\pm \beta$ относительно поперечной оси носителя [6].

Передающими кормовыми электродами для третьего диполя служат соединенные параллельно

электроды А1, А2, а носовыми – соединенные электроды В1, В2. Приемные электроды коммутируются из электродов Н1, Н2 правого и М1, М2 левого бортов, при этом ось третьего передающего диполя совпадает с продольной осью носителя. Такая организация дипольной системы ЭМИ позволяет измерять угол γ пересечения курса носителя с продольной осью донного объекта в полном диапазоне практически от минус 90 до плюс 90 град, тогда как для одиночной дипольной системы сигнал ЭМИ становится равным нулю при углах пересечения 0 и 90 град (например, рис. 5). Сигналы U_1 первого диполя и U_2 второго диполя используются в ЭМИ для вычисления значения угла пересечения γ , а сигнал U_p , полученный с третьего диполя – для определения наличия объекта.

Угол пересечения γ определяется в ЭМИ из выражения, приведенного в [2, 7]:

$$a \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma + b \cdot \operatorname{tg} \gamma + c = 0, \quad (3)$$

где коэффициенты a, b, c вычисляются по параметрам α, β дипольной системы (см. рис. 1, а) и измеренным значениям напряжений U_p, U_2 на приемных диполях М1-Н1 и М2-Н2 соответственно:

$$a = (U_1 + U_2) \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad (4)$$

$$b = (U_2 - U_1)(\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta), \quad (5)$$

$$c = -(U_1 + U_2) \cos \alpha \cdot \sin \beta. \quad (6)$$

Приведенные выражения положены в основу вычислительных процедур, реализованных в прошивке контроллера блока электроники ЭМИ. Натурные испытания ЭМИ с целью определения точности определения угла пересечения курса носителя с продольной осью донного объекта показали высокую точность функционирования ЭМИ: ошибка в определении угла не превышала 2 – 3 град от значения установленного угла в полном диапазоне измерений от минус 90 до плюс 90 град.

Аналогичные измерения были выполнены в математической модели. Постановка компьютерного эксперимента, имеющего целью определение передаточной характеристики ЭМИ как зависимости угла пересечения курса носителя с продольной осью протяженного донного объекта, полностью соответствовала указанному натурному эксперименту. Решение задачи выполнялось на основе представленной выше схемы моделирования в программе COMSOL, при этом в модели качестве донного объекта использовался металлический пруток диаметром 20 мм. Содержание эксперимента заключалось в последовательной установке донного объекта под различными

ми углами пересечения с продольной центральной осью носителя и регистрации в ЭМИ вычисленных значений углов пересечения. Установленный в модели угол пересечения изменялся в пределах от плюс 75 до минус 75 град через 15 град. Соответствующий вычисленный угол пересечения определялся в математической модели с использованием выражений (3–6). Полученная передаточная характеристика ЭМИ показана на рис. 14.

Схема математического моделирования максимально повторяла условия натурального эксперимента

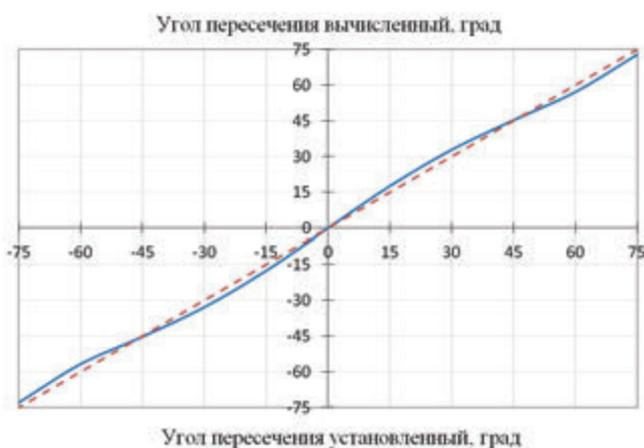


Рис. 14. Передаточная характеристика ЭМИ (штриховая линия соответствует единичному коэффициенту передачи)

на лабораторном стенде (см. рис. 3), т.е. параметры среды и геометрические размеры макета дипольной системы, а также ее электрические параметры соответствовали условиям исследований на лабораторном стенде.

Как следует из полученных результатов, точность реализации передаточной характеристики ЭМИ как датчика угла рассогласования между курсом носителя и продольной осью протяженного донного объекта можно признать достаточно точной (отклонение от линейной характеристики не превышает 3 град). Опыт управления АНПА в режиме удержания постоянного курса показывает, что ошибка ре-

гулирования в стационарном режиме отслеживания, не превышающая 3 град, является приемлемой, т.е. полученная точность передаточной характеристики является пригодной для применения в последующих комплексных исследованиях и построениях алгоритмов управления носителем при решении различных задач отслеживания прокладки объекта.

Выводы

В работе предложено новое представление процесса взаимодействия ЭМИ с протяженным донным объектом, при этом объект может быть как с электропроводной поверхностью, так и с изоляционным покрытием. Введено понятие объемного поля токов в проводящей среде в зоне излучения сигналов передающими диполями ЭМИ, и экспериментально определена связь между потенциалами на приемных диполях и физическими характеристиками внесенного в объемное поле токов протяженного донного объекта. Выполнено уточнение алгоритма функционирования ЭМИ, разработанного ранее в ИПМТ ДВО РАН, что повысило точность определения угла пересечения курса АНПА с донным объектом. Предложена математическая модель процесса взаимодействия ЭМИ и донного объекта. Идентификация модели выполнялась с контролем адекватности при взаимно дополняющих результатах моделирования и параллельных исследований физической модели процесса взаимодействия в натуральных условиях на стенде, при этом отклонение полученной результирующей передаточной характеристики математической модели ЭМИ от линейной зависимости не превышает 3 град. Результаты выполненных исследований убедительно подтверждают справедливость предложенной гипотезы о природе процесса взаимодействия ЭМИ с донным объектом и адекватность разработанной модели процесса. Это дает основу для создания полной математической модели комплекса «ЭМИ – АНПА» с целью отработки алгоритмов управления в различных режимах отслеживания донного объекта при движении АНПА с ЭМИ на борту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2001. Вып. 4.
2. Кукарских А.К., Павин А.М. Электромагнитный искатель для обнаружения и отслеживания металлосодержащих подводных протяженных объектов // Приборы. 2008. № 4. С. 33–38.
3. Фрейдзон И.Р. Моделирование корабельных систем управления. Ленинград: Судостроение, 1975.
4. Патент 2672775 RU, МПК G01V 3/08 (2006.01). Устройство для обнаружения и отслеживания металлосодержащего подводного объекта с борта автономного необитаемого подводного аппарата / Герасимов В.А., Павин А.М., Телешев А.В.: заявл. 31.01.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32.

5. Патент 2757328 Российская Федерация, МПК G01V 3/08 (2006/01). Устройство для обнаружения и отслеживания металлосодержащего протяженного подводного объекта с борта автономного необитаемого подводного аппарата / Герасимов В.А., Телешев А.В.: опублик. 13.10.2021, Бюл. № 29.

6. Патент RU 2280268, МПК G01V 3/08 (2006.01). Устройство для обнаружения и отслеживания металлосодержащего протяженного подводного объекта с борта подводной поисковой установки. Агеев М.Д., Кукарских А.К.: опублик. 20.07.2006, Бюл. № 20.

7. Кукарских А.К., Павин А.М. Оптимизация характеристик электромагнитного гидролокатора подводного робота на основе дифференциальной методики расчета приемных сигналов // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 2(6). С. 43–49.

Сведения об авторах:

ГЕРАСИМОВ Владимир Александрович, к. т. н., профессор, заведующий лабораторией энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: 8(423)243-25-87, доб. 205

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

ORCID: 0000-0003-0246-475X

КАТРУШЕНКОВ Антон Павлович, инженер

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: 8(423)243-25-87, доб. 207

E-mail: antonidaskatrushenkov@gmail.com

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

ORCID: 0009-0001-0630-0958

КНЯЖЕВ Валерий Викторович, к. т. н., с. н. с. лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: 8(423)243-25-87, доб. 215

E-mail: kvv@marine.febras.ru

Область научных интересов: исследование природных возобновляемых энергетических потоков. Разработка методов, устройств и энергетических комплексов на возобновляемых источниках для автономных объектов

КОМЛЕВ Антон Владимирович, к. т. н., с. н. с. лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: 8(423)243-25-87, доб. 207

E-mail: kom86@bk.ru

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

ORCID: 0000-0001-8862-8676

ЛОЩЕНКОВ Владимир Васильевич, н. с. лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: 8(423)243-25-87, доб. 215

E-mail: lvv@marine.febras.ru

Область научных интересов: исследование природных возобновляемых энергетических потоков. Разработка методов, устройств и энергетических комплексов на возобновляемых источниках для автономных объектов

НАЙДЕНКО Николай Александрович, н. с. лаборатории систем навигации и обработки сенсорной информации

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Тел.: +79510076596

E-mail: nna0502@gmail.com

Область научных интересов: подводная робототехника, электроника, микропроцессорная техника

ORCID: 0000-0002-5685-1838



DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE FUNCTIONING PROCESS MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC DETECTOR FOR EXTENDED BOTTOM OBJECTS

V. A. Gerasimov, A.P. Katrushenkov, V.V. Knyazhev,
A.V. Komlev, V.V. Loshchenkov, N.A. Naydenko

When inspecting extended bottom objects, a promising solution is the use of an electromagnetic detector (EMD) installed on an underwater carrier, in particular, an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV). In general, the aim of the EMD is to detect a bottom object and generate signals to control the carrier in order to track the object. The article proposes a new model of the EMD interaction process with an extended bottom object, both with and without an insulating surface coating. The concept of a volumetric field of currents in a conducting medium in the zone of signal emission by transmitting dipoles is introduced. The relationship between the potentials on the receiving dipoles and the physical characteristics of an extended bottom object introduced into the volumetric field of currents is determined. The EMD algorithm, developed earlier at the IMTP FEB RAS, was refined, which made it possible to increase the accuracy of determining the angle of intersection of the AUV course with the bottom object. A mathematical model of the interaction between the EMD and the bottom object is proposed. The adequacy of the model was checked by comparing the simulation results with the physical model of the interaction process at the stand. The results obtained convincingly confirm the validity of the proposed hypothesis about the EMD interaction physical nature with the bottom object and the adequacy of the developed mathematical model. This provides the basis for creating a complete mathematical model of the EMD–AUV complex in order to build and study AUV control algorithms in various object tracking modes.

Keywords: extended bottom object, electromagnetic detector, autonomous uninhabited underwater vehicle, volumetric field of currents, interaction process model, computer and field experiment.

References

1. Ageev M.D., Kukarskikh A.K. Elektromagnitnyy gidrolokator dlya obnaruzheniya i otslezhivaniya protyazhennykh ob'yektov s borta ANPA [Electromagnetic sonar for detecting and tracking extended objects on board the AUV] // *Morskiye tekhnologii*. Vladivostok: Dal'nauka, 2001. No 4. (in Russ.).
2. Kukarskikh A.K., Pavin A.M. Elektromagnitnyy iskatel' dlya obnaruzheniya i otslezhivaniya metallosoderzhashchikh podvodnykh protyazhennykh ob'yektov [Electromagnetic detector for detecting and tracking metal-containing underwater extended objects] // *Pribory*. 2008. № 4. P. 33–38. (in Russ.).
3. Freydzon I.R. Modelirovaniye korabel'nykh sistem upravleniya [Simulation of shipboard control systems]. Leningrad: Sudostroyeniye, 1975 (in Russ.).
4. Device for detecting and tracing metal containing extended underwater object from side of autonomous uninhabited underwater vehicle. Patent № RU 2672775 C1 of the Russian Federation / Gerasimov V.A., Pavin A.M., Teleshev A.V. No 2018103805, application on 31.01.2018; published on 19.11.2018. Bull. 32 (in Russ.).
5. Device for detecting and tracking a metal-containing extended underwater object from an autonomous unmanned underwater vehicle. Patent № RU 2757328 C1 of the Russian Federation / Gerasimov V.A., Teleshev A.V. No 2021108666, application on 31.03.2021; published on 13.10.2021. Bull. 29 (in Russ.).
6. Device for finding and tracking metal-containing extensive underwater objects from onboard the underwater finding apparatus. Patent № RU 2280268 C1 of the Russian Federation / Ageev M.D., Kukarskikh A.K. No 2005103462/28, application on 10.02.2005; published on 20.07.2006. Bull. 20 (in Russ.).
7. Kukarskikh A.K., Pavin A.M. Electromagnetic sonar parameters optimization based on differential design receiver signals procedure // *Underwater research and robotics*. 2008. No 2 (6). P. 43–48 (in Russ.).

Recommended citation:

Gerasimov V.A., Katrushenkov A.P., Knyazhev V.V., Komlev A.V., Loshchenkov V.V., Naydenko N.A. DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE FUNCTIONING PROCESS MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC DETECTOR FOR EXTENDED BOTTOM OBJECTS. *Underwater investigations and robotics*. 2026. No. 1 (55). P. 23–37. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_55_01_03. EDN: GNDPFP.

Information about authors

GERASIMOV Vladimir Alexandrovich, Ph.D., Head of the Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: 8(423)243-25-87
E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru
Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment
ORCID: 0000-0003-0246-475X

KNYAZHEV Valery Viktorovich, Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: 8(423)243-25-87
E-mail: kvv@marine.febras.ru
Research interests: research of natural renewable energy flows. Development of methods, devices and energy complexes on renewable sources for autonomous objects

KOMLEV Anton Vladimirovich, Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems, Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: 8(423)243-25-87
E-mail: kom86@bk.ru
Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment
ORCID: 0000-0001-8862-8676

KATRUSHENKOV Anton Pavlovich, Researcher, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: 8(423)243-25-87
E-mail: antonidaskatrushenkov@gmail.com
Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment
ORCID: 0009-0001-0630-0958

LOSHCHENKOV Vladimir Vasilevich, Researcher, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: 8(423)243-25-87
E-mail: lvv@marine.febras.ru
Research interests: research of natural renewable energy flows. Development of methods, devices and energy complexes on renewable sources for autonomous objects

NAYDENKO Nikolay Alexandrovich, Researcher, Laboratory of Navigation Systems and Sensory Information Processing
Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Phone: +79510076596
E-mail: nna0502@gmail.com
Research interests: underwater robotics, electronics, microprocessor technology
ORCID: 0000-0002-5685-1838

