

**Національне агентство з питань інформатизації
при Президентові України
Державний науково-дослідний інститут
інформаційної інфраструктури**

**КУЛИНИЧ
Ярослав Петрович**

УДК 537.811:517.96

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
СИГНАЛІВ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ
ПОШУКОВИХ СИСТЕМ МОРСЬКОЇ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ**

Спеціальність 01.05.02 - математичне моделювання
та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

ЛЬВІВ-1997



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка
Національної академії наук України

Наукові керівники:

докт. техн. наук, **Гордієнко Володимир Іванович**,
Державний університет "Львівська політехніка",
професор;
чл.-коресп. НАН України, докт. фіз.-мат. наук, **Назарчук Зіновій Теодорович**,
Фізико-механічний інституті НАН України, заст.директора.

Офіційні опоненти:

докт. техн. наук, проф., **Стахів Петро Григорович**,
Державний університет "Львівська політехніка",
зав. кафедрою;
канд. фіз.-мат. наук, ст.наук. співр., **Андрійчук Михайло Іванович**,
Інститут прикладних проблем механіки і математики НАН України, ст.наук. співр.

Провідна організація:

Харківський державний університет (кафедра теоретичної радіофізики),
Міністерство освіти України, м. Харків

Захист відбудеться "11" зрудня 1997 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.813.01 в Державному науково-дослідному інституті інформаційної інфраструктури (290601, м.Львів, вул. Наукова, 5а).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури (290601, м.Львів, вул. Наукова, 5а).

Автореферат розісланий "6" листопада 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

докт. техн. наук, ст.наук. співр.

Бунь Р.А

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Інтенсивне освоєння Світового океану, зокрема, його шельфу зумовило створення розгалуженого підводного господарства у вигляді складних інженерних споруд. Їх будівництво, експлуатація, подальше вдосконалення і розширення, надійна охорона вимагають розв'язання ряду складних інженерно-технічних задач, в тому числі такої як пошук, виявлення і захист від різного роду замулень чи рухомих локальних неоднорідностей. Ця задача особливо актуальною є в регіонах "мілкого" моря. Один із напрямків розв'язання такої задачі складають методи морської електророзвідки (МЕР) з власними джерелами низькочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Основним шляхом інтенсивної розробки методології МЕР є проведення математичного моделювання. Його мета полягає в тому, щоб дати кількісний аналіз залежностей інформаційних сигналів від параметрів середовища і об'єкта пошуку. Структура пошукових систем (ПС), яка визначається типами джерела (ДП) і приймача поля (ПП), їх взаємним розміщенням, а також алгоритмом обробки вхідних сигналів, вважається заданою.

Математичне моделювання дозволяє, по-перше, суттєво прискорити і в значній мірі автоматизувати процес дослідження; по-друге, значно зменшити матеріальні затрати на проектування і розробку нових технологій і технічних засобів.

Специфічні труднощі, що виникають при розробці теорії та методів МЕР із низькочастотним ЕМП, зумовлені структурою оточуючого середовища, особливостями якої полягає в наявності шарів - повітря, морської води і дна з різко відмінними електродинамічними параметрами. Якщо джерело поля знаходиться у морській воді, то інтенсивність і просторова структура створюваного ЕМП в такому середовищі, в основному, визначається товщиною шару морської води, а також її фізико-хімічними властивостями і динамічним станом. Внаслідок значної за величиною (до 6 См/м) питомої електропровідності морської води довжина хвилі ЕМП стає співмірною з відстанями між точкою спостереження, ДП і неоднорідністю, а також між границями розділу "повітря-вода" і "вода-дно". Це не дозволяє при проведенні чисельного моделювання використовувати відомі асимптотичні вирази ближньої та дальньої зон ЕМП, які успішно застосовуються в аналогічних задачах на-

земної та аероелектророзвідках. Тому при математичному моделюванні ЕМП і інформаційних сигналів пошукових систем МЕР необхідно виходити із строгої постановки відповідних крайових задач електро. інаміки кусково - неоднорідних середовищ. При цьому досить важливою і актуальною стає проблема побудови і обґрунтування наближених розв'язків цих задач, придатних для чисельного аналізу характеристик ЕМП в морському середовищі.

Виходячи з фактичних даних пошуково-спостережних робіт в морському середовищі і результатів фізичного моделювання, для теоретичного аналізу як модель малих локальних неоднорідностей пошуку достатньо прийняти сферичну неоднорідність.

В теоретичному плані найбільш детально досліджені математичні моделі ЕМП різних джерел в присутності неоднорідності сферичної форми в однорідному просторі. Цим пояснюється той факт, що в опублікованих роботах, присвячених теоретичним проблемам МЕР, як правило, використовувалась модель оточуючого середовища у вигляді провідного нескінченного однорідного простору (морська вода), для якого розв'язки відповідних математичних задач мають досить простий вигляд.

Значно слабше представлені дослідження по математичному моделюванню ЕМП сферичної неоднорідності в кусково-неоднорідному середовищі. В більшості робіт, в яких розглядалась ця проблема, при побудові строгого або наближеного розв'язку відповідної математичної задачі так чи інакше використовувались певні припущення вже при їх постановці (симетричність задачі, обмеження на електрофізичні властивості неоднорідності і оточуючого простору і т.п.).

Для побудови строгого розв'язку задачі про визначення ЕМП, обумовленого розміщеною в плоскошаруватому середовищі сферичною неоднорідністю, ефективним є метод розділення змінних. Головна перевага цього методу - побудова строгого розв'язку задачі у вигляді розкладу за спеціальними функціями, теорія яких детально розроблена.

Відмінною ознакою МЕР є також наявність завад, які не зустрічаються в наземній та аероелектророзвідці, зокрема, зумовлених динамічним станом морської води. Вимірювання змін ЕМП, які породжуються рухом морської води відносно засобів вимірювання, в природних умовах часто або неможливі, або пов'язані з значними матеріальними затратами. Тому одним із шляхів оцінки цих змін є

проведення математичного моделювання.

Найбільш детально розроблені методи розрахунку полів, які ґрунтуються на рівняннях Максвела-Герца. В той же час, необхідність вимірювання малих інтенсивностей ЕМП локальних неоднорідностей вимагає застосування при побудові математичних моделей ЕМП, зумовленого рухом морської води в полі власних джерел ПС, більш точних рівнянь зв'язку між векторами ЕМП в рухомому середовищі, якими є рівняння Максвела - Мінковського.

Теоретичні і практичні результати, які вміщені в даній роботі, одержані автором при виконанні науково-дослідних робіт: "Розробка теорії, методів і засобів відбору інформації за допомогою електромагнітних полів з метою підвищення ефективності пошуку, виявлення, розпізнавання і селекції простих провідних об'єктів при розв'язку в русі задач наземної і морської електророзвідки" (№ Держреєстрації 0386.0033885); "Дослідження питань підвищення метрологічних і експлуатаційних характеристик і принципів побудови високоєфективних електромагнітних систем пошуку і виявлення підземних і підводних комунікацій" (№ Держреєстрації 0282.6011331); "Дослідження можливостей створення інформаційних електромагнітних систем виявлення малорозмірних підводних об'єктів в прибережних водах і на мілководді" (№ Держреєстрації 0194V036860) і "Дослідження та розробка принципів побудови системи водіння плавзасобів по заданих трасах та створення її експериментального зразка" (№ Держреєстрації 0194V036859), виконаних в Фізико-механічному інституті ім. Г. Карпенка НАН України, а також при виконанні г/д для ряду зацікавлених організацій.

Вище викладене визначає мету дисертаційної роботи, яка полягає в розробці математичних моделей ЕМП і відповідних інформаційних сигналів для систем пошуку і виявлення локальних неоднорідностей в морському середовищі за допомогою низько-частотного ЕМП.

Для досягнення поставленої мети розв'язано наступні задачі:

- проведено вибір моделей елементів ПС МЕР, оточуючого середовища, об'єктів пошуку і інформаційних сигналів;
- побудовано та досліджено математичну модель ЕМП, обумовленого сферичною неоднорідністю в тришаровому середовищі;
- отримано аналітичні описи для векторів вторинного ЕМП малої сферичної неоднорідності в тришаровому середовищі в полі

електричного і магнітного диполів, нитки струму;

- виходячи з рівнянь Максвелла-Мінковського, розроблені математичні моделі ЕМП електричного і магнітного диполів та нитки струму повільно рухомому середовищі;

- розроблено пакет прикладних програм (ППП) для числового моделювання вторинних полів і інформаційних сигналів малої сферичної неоднорідності у різних оточуючих середовищах, а також ЕМП електричного і магнітного диполів, нитки струму і відповідних сигналів ПС, зумовлених рухом провідного середовища;

- досліджено залежності характеристик електромагнітного поля та інформаційних сигналів малої сферичної неоднорідності від параметрів ПС, неоднорідності, їх взаємного розташування в морському середовищі та на цій основі запропоновано нові способи визначення глибини залягання локальної неоднорідності і її положення в плані відносно ПС;

- проведено оцінку просторових складових векторів поля і характеристик сигналів, обумовлених рухом морського середовища для різних моделей власних ДПІ систем пошуку МЕР.

Методи дослідження. В основу методології дослідження вторинного ЕМП сферичної неоднорідності в шаруватих середовищах покладено метод розділення змінних, основні положення теорії нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь (НСЛАР) та метод малого параметру. Дослідження ЕМП в рухомих середовищах проведені за допомогою методу функції Гріна. Теоретичний аналіз в роботі поєднується з розробкою і побудовою ППП. При його реалізації використані наближені методи обчислень інтегралів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- розроблено математичну модель вторинного ЕМП локальних неоднорідностей в морському середовищі з врахуванням границь розділу "повітря-морська вода" і "морська вода-морське дно", яка дає можливість проводити кількісний аналіз інформаційних сигналів ПС МЕР з власними джерелами низькочастотного ЕМП;

- на основі рівнянь Максвелла - Мінковського побудовано математичну модель ЕМП, зумовленого рухом морської води в полі власних джерел ПС, яка дозволяє провести кількісну оцінку впливу динамічного стану оточуючого середовища на сигнали ПС МЕР;

- шляхом чисельного моделювання встановлено залежності параметрів векторів вторинного ЕМП сферичної неоднорідності від її глибини залягання і положення в плані, які дозволяють визначити

місцеположення локальної неоднорідності в морському середовищі.

На захист виносяться:

- розв'язок математичної задачі визначення ЕМП в тришаровому середовищі з двома горизонтальними граничними площинами, середній шар якого містить джерело ЕМП - довільно орієнтований електричний (магнітний) диполь і неоднорідність сферичної форми та отриманий на його основі наближений розв'язок для малої провідної неоднорідності;

- хвильове рівняння для вектор-потенціалу та його функція Гріна отриманих при побудові математичної моделі гармонійно змінного ЕМП в однорідному повільно рухомому середовищі;

- аналітичні описи векторів ЕМП нитки струму, електричного і магнітного диполів в однорідному повільно рухомому середовищі;

- результати числового моделювання вторинних полів і інформаційних сигналів від малої провідної сферичної неоднорідності для різних моделей оточуючого середовища, а також полів і відповідних сигналів ПС, зумовлених рухом провідного середовища в ЕМП електричного і магнітного диполів, нитки струму;

- встановлені залежності параметрів ЕМП сферичної неоднорідності від її глибини залягання і положення в плані, які покладені в основу запропонованих методик визначення місцеположення локальної неоднорідності в морському середовищі.

Практична цінність. Отримані теоретичні результати і розроблене програмне забезпечення дозволяють проводити математичне моделювання залежностей сигналів ПС МЕР від параметрів локальних об'єктів пошуку, оточуючого середовища і ПС, які можуть бути використані для вибору оптимальних параметрів елементів ПС МЕР.

Результати проведених досліджень ЕМП і інформаційних сигналів ПС МЕР лягли в основу нових технічних рішень, які захищено авторськими свідоцтвами № 1394957 від 08.01.88р., № 1501749 від 15.04.89р., № 311497 від 02.04.90р., № 1611100 від 01.09.90р., № 324918 від 01.04.91р., № 326859 від 03.06.91р. і № 329641 від 01.09.91р.

Реалізація та впровадження результатів роботи. На основі запропонованих і розроблених математичних моделей створено програмні засоби чисельного аналізу залежностей характеристик ЕМП локальних неоднорідностей від параметрів неоднорідності, оточуючого середовища та ПС, які використані при розробці до-

слідних зразків інформаційно-вимірювальних і пошукових систем в рамках тем "Щитовник", "Фуксія" і "Кореляція", що виконувались в Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка НАН України.

А робота роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались: на X, XI і XII конференціях молодих вчених Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (м.Львів, 1983,1984 і 1985 рр.), на 1-й конференції молодих вчених і спеціалістів "Проблеми підвищення якості матеріалів, приладів і обладнання" (м.Львів, 1984 р.), на 6-ому Всесоюзному семінарі "Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований" (с.Кацивели, Кримської АР, 1986 р.), на II Всесоюзній конференції по теоретичній електротехніці (м. Винниця, 1991р.) і на Міжнародній конференції "Інтеграція систем цільової підготовки спеціалістів і автоматизованих систем різного призначення" (м.Алушта, 1990 р.).

По темі дисертації опубліковано 7 робіт, в тому числі 1 монографія.

Структура та обсяг роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатку та містить 144 сторінок машинописного тексту, 40 рисунків і список літератури з 130 найменувань на 14 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, які необхідно розв'язати, подано короткі анотації розділів дисертації, сформульовано основні положення, які виносяться на захист.

У першому розділі на основі узагальнення відомих результатів теоретичних і експериментальних досліджень уточнено поняття інформаційного (корисного) сигналу стосовно ПС МЕР, вибрано моделі власних джерел ЕМП, приймачів поля, об'єктів пошуку та оточуючого середовища, які необхідні для проведення математичного моделювання цих сигналів.

ЕМП в неоднорідному середовищі (вхідний сигнал ПС) в загальному випадку є амплітудно- фазо-модульованим коливанням, значення параметрів якого залежать як від відомих параметрів першого поля, так і від зміни значень параметрів оточуючого сере-

довища, в тому числі і тих, які викликані наявністю об'єктів пошуку. Сигнал на виході приймально-реєструючої частини ПС, який визначається методом обробки вхідного сигналу (детектування), розглядається як інформаційний.

У більшості випадків ширина частотної смуги вхідного сигналу є значно меншою від частоти первинного поля. Це дає підставу розглядати його як вузькосмуговий, а відповідно, інформаційний - як низькочастотний.

Як найбільш типові для практики вибрано наступні моделі оточуючого середовища: нерухомий і рухомий безмежний однорідний простір, два однорідних півпростори, розділених нескінченною площиною і тришаровий простір з плоскопаралельними площинами розділу, в середньому шарі якого знаходиться неоднорідність; ДП і ГП. Як модель локальних об'єктів пошуку вибрана сферична неоднорідність.

Для опису однокомпонентних ГП запропоновано використовувати вектор в точці прийому, напрям якого співпадає з віссю чутливості ГП. Як моделі реальних ДП ПС МЕР розглядаються електричний та магнітний диполі, а також нитка струму.

Здійснено огляд відомих праць вітчизняних і зарубіжних авторів, в яких розглядаються методи розрахунку характеристик ЕМП, обумовленого неоднорідністю для різних моделей оточуючого середовища.

Проблема побудови математичних моделей вторинного ЕМП неоднорідностей різного типу в шаруватому середовищі розглядалась у роботах Дьяконова Б.П., Жука Н.П., Єрофеєнка Е.Т., Козіної О.Г., Назарчука З.Т., Третьякова О.А., Ярового О.Г., Dosso H.W., Lee T.J., Negi J.G., Ogunade S.O. та інших. На основі проведеного огляду встановлено, що обчислення характеристик вторинного ЕМП сферичної неоднорідності в плоскошаруватому середовищі тим чи іншим методом зводиться до розв'язку НСЛАР відносно коефіцієнтів розкладу векторів вторинного поля за елементарними сферичними функціями. При виводі НСЛАР зроблено припущення вже при постановці задачі (симетричність задачі, обмеження на електрофізичні властивості неоднорідності і оточуючого простору і т.п.). Часто відсутнє обґрунтування математичної коректності застосування того чи іншого методу розв'язку НСЛАР.

Запропоновано для знаходження НСЛАР використати підхід, викладений в роботах Є.І.Іванова та Е.Т.Єрофеєнка, в основу якого

покладено метод розділення змінних (метод Фур'є).

В опублікованих на даний час роботах, які присвячено задачам електродинаміки рухомих середовищ, мало приділяється уваги вивченню методів побудови та дослідженню математичних моделей змінного в часі ЕМП штучних джерел в повільно рухомих середовищах.

Найбільш детально розроблені методи розрахунку полів, які виникають із-за руху тіл різної фізичної природи в постійному магнітному (електричному) полі (Меєрович Е.А., Сочельников В.В., Фонарев Г.А., Веал Н.Т., Роглеу В. та ін.) або в полі плоскої хвилі. У більшості випадків теоретичні основи цих методів ґрунтуються на рівняннях Максвела-Герца. На основі рівнянь Максвела-Мінковського найбільш повно досліджене лише ЕМП плоскої хвилі в непровідному рухомому середовищі.

В другому розділі побудована математична модель ЕМП в повільно рухомих середовищах, яка ґрунтується на рівняннях Максвела - Мінковського. Її побудова проведена при наступних припущеннях:

а) безмежне однорідне і ізотропне середовище переміщується відносно спостерігача із швидкістю \vec{u} , яка залежить тільки від часу t і $|u/c| \ll 1$, де c - швидкість світла;

б) рівняння зв'язку між векторами ЕМП в довільний момент часу аналогічні відповідним рівнянням у випадку руху середовища з постійною швидкістю.

Для побудови розв'язку рівнянь Максвела-Мінковського використано представлення векторів поля через векторний \vec{A} і скалярний Φ потенціали за допомогою співвідношень

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A} + \kappa \Phi \vec{u}), \quad \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} \Phi - \kappa \frac{\partial}{\partial t}(\Phi \vec{u}),$$

де $\kappa = \epsilon\mu - \epsilon_0\mu_0$. Тут і далі позначення всіх величин відповідають загальноприйнятим. Із застосуванням умови калібрувки у вигляді

$$\text{div} \vec{A} - \kappa \frac{\partial}{\partial t}(\vec{A} \vec{u}) - \sigma \mu \Phi - \epsilon \mu \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0,$$

задача зведена до розв'язку системи диференціальних рівнянь відносно \vec{A} і Φ .

Показано, що для опису ЕМП гармонійних в часі джерел $\vec{J}_s(\vec{r}, t) = \vec{J}_s(\vec{r}) \exp(-j\omega t)$, коли компоненти вектора швидкості $\vec{u}(t)$ - повільно змінні функції, достатньо використовувати лише векторний по-

тенціал. Якщо вектор - потенціал зобразити у вигляді $\vec{A}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) \exp(-j\omega t)$, то рівняння для знаходження \vec{A} набуває наступного вигляду:

$$\Delta \vec{A} + j\omega (\kappa + \kappa) (\vec{u} \text{grad}) \vec{A} + k_0^2 \vec{A} = -\mu \vec{j}_s, \quad (1)$$

де $k_0^2 = j\omega \sigma \mu + \omega^2 \epsilon \mu$, $j\omega \kappa = j\omega \kappa - \sigma \mu$, а для векторів поля справедливі рівності

$$\vec{E} = j\omega \vec{A} + \{j\omega [\text{grad div} \vec{A} + j\omega \kappa \text{grad}(\vec{u} \vec{A}) - \omega^2 \kappa \{\vec{u} \text{div} \vec{A} + j\omega \kappa \vec{u}(\vec{u} \vec{A})\}] / k_0^2,$$

$$\vec{H} = (\text{rot} \vec{A} + j\omega \kappa \{\vec{u} \vec{A}\}) / \mu,$$

де $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \exp(-j\omega t)$, $\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}, t) \exp(-j\omega t)$.

Для рівняння (1) отримано розв'язок у вигляді

$$\vec{A} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int G(\vec{r} - \vec{r}') \vec{j}_s(\vec{r}') dx' dy' dz',$$

де

$$G(\vec{r} - \vec{r}') = \exp[k_u(\vec{u} \cdot \vec{r} - \vec{r}')] K_0(-fk_1 |\vec{r} - \vec{r}'|) / 4\pi,$$

$$G(\vec{r} - \vec{r}') = \exp[k_u(\vec{u} \cdot \vec{r} - \vec{r}') + fk_1 |\vec{r} - \vec{r}'|] / 4\pi (|\vec{r} - \vec{r}'|).$$

відповідно, дво- і тривимірні функція Гріна, $k_u = -[j\omega(\kappa + \kappa)] / 2$,

$k_1^2 = k_u^2 + k_u^2$, $K_0(z)$ - функція Беселя уявного аргументу.

За допомогою отриманого розв'язку знайдено загальні аналітичні вирази для векторів ЕМП електричного і магнітного диполів та нитки струму в рухомому однорідному середовищі.

Для низькочастотного ЕМП в провідному рухомому середовищі, за умов $\sigma \mu r / 2 \ll 1$; $\sqrt{\sigma \mu} \ll \sqrt{\omega}$ (r - мінімальна відстань між джерелом поля і точкою спостереження), отримані вирази представлено у вигляді суми двох доданків: перший - це вираз для векторів поля в нерухомому середовищі, а другий, пропорційний параметру $\sigma \mu r / 2$, - описує зміни ЕМП, викликані рухом середовища.

В третьому розділі розроблена математична модель вторинного ЕМП сферичної неоднорідності в тришаровому середовищі та проведено її дослідження. Неоднорідність і ДП знаходяться в середньому шарі.

Для побудови розв'язку відповідної математичної задачі використано векторні хвильові функції в циліндричній і сферичній системах координат.

З врахуванням відомих формул взаємного перерозкладу розв'язків скалярного хвильового рівняння в циліндричній і сферичній системах координат отримано аналогічні формули пере-

розкладу векторних хвильових функцій, а також зображення векторів первинного ЕМП електричного диполя у вигляді ряду за векторними хвильовими функціями в циліндричній і сферичній системах координат, центр яких не співпадає з точкою, в якій знаходиться диполь.

Використовуючи знайдені співвідношення і предсталиючи шукані вектори вторинного ЕМП сферичної неоднорідності у вигляді суми двох рядів за векторними хвильовими функціями: в циліндричній та в сферичній системах координат задача зведена до розв'язання НСЛАР відносно коефіцієнтів розкладу $z_n^{(m)}$ векторів шуканого поля за векторними хвильовими функціями в сферичній системі координат:

$$z_n^{(m)} = \sum_{k=3}^{\infty} T_{nk}^{(m)} z_k^{(m)} + S_n^{(m)}. \quad (2)$$

Показано, що система (2) має цілком неперервну форму в просторі l^2 . Доведено, що у випадку, коли сферична неоднорідність не дотикається до границь розділу однорідних шарів, отримана НСЛАР при довільних значеннях електродинамічних і геометричних параметрів має єдиний розв'язок.

Для малої сферичної неоднорідності з точністю до величин порядку $|k_0 a|^3$ (a —радіус неоднорідності) отримано наближений розв'язок НСЛАР:

$$z_n^{(m)} = \begin{cases} S_n^{(m)} / (1 - T_{33}^{(m)} - T_{44}^{(m)}), & n=3,4; \\ 0, & n>4. \end{cases}$$

Отриманий розв'язок використано для знаходження наближених виразів векторів вторинного поля малої неоднорідності в полі диполя (магнітного і електричного) і нитки струму.

В четвертому розділі викладено основні результати чисельного моделювання параметрів: а) просторових складових векторів вторинного ЕМП сферичної неоднорідності і відповідних інформаційних сигналів для різних моделей оточуючого середовища і варіантів ПС; б) просторових складових векторів поля і характеристик сигналів, обумовлених рухом середовища для різних моделей джерел ЕМП, які отримані за допомогою розробленого пакету прикладних програм.

Аналіз структури вторинного поля сферичної неоднорідності і відповідних корисних сигналів виконаний для різних варіантів ПС

МЕР в залежності від значень параметрів: відстані між ДП і ГП (R), зміщення курсу руху ПС відносно вертикальної площини (площини профілювання), яка проходить через центр неоднорідності (s), висоти проходу ПС над горизонтальною площиною, в якій розташований центр неоднорідності (h) і частоти ЕМП. Розглядалися тільки ПС з одним ГП, які рухаються з постійною швидкістю по прямій лінії, паралельній горизонтальній площині, в якій розташований центр неоднорідності.

Показано, що для якісного аналізу вторинного поля і відповідних інформаційних сигналів неоднорідності достатньо використовувати модель оточуючого середовища у вигляді однорідного простору, а для кількісного аналізу - модель оточуючого середовища у вигляді тришарового простору.

Аналіз результатів чисельного моделювання дозволив встановити, що для диполя, момент якого паралельний осі Y, відношення складових вектора вторинного магнітного (електричного) поля $H_n^z(E_n^z)$ і $H_n^x(E_n^x)$ у випадку однорідного простору, є лінійною функцією відношення s/h. Для тришарового простору залежність цих відношень від h при фіксованому значенні s на інтервалі, який визначається нерівністю $h < R$, є монотонно зростаючою.

Встановлена властивість відношення параметрів просторових складових векторів вторинного поля дає принципову можливість використання його для визначення глибини залягання локальної неоднорідності в морському середовищі при відомому зміщенні s.

Положення в плані локальної неоднорідності в процесі руху ПС з ДП у вигляді електричного (магнітного) диполя пропонується визначати за допомогою точок максимуму або мінімуму залежностей параметрів складової вектора вторинного електричного (магнітного) поля, паралельної моменту диполя..

У випадку використання ДП у вигляді нитки струму запропоновано для визначення положення локальної сферичної неоднорідності використовувати суміщені ПС. Такий вибір обґрунтовується виявленими властивостями просторових складових векторів вторинного магнітного поля сферичної неоднорідності в точці спостереження, яка співпадає з ниткою струму.

Ці властивості полягають у наступному: а) якщо нитка струму паралельна осі X, то в процесі руху ПС амплітуда складових H_n^z і H_n^y вектора вторинного магнітного поля приймає, відповідно,

мінімальне і максимальне значення в момент проходження нитки над центром сферичної неоднорідності; б) відстань, яку проходить ПС за інтервал часу, який визначається моментами рівності амплітуд складових H_B^z і H_B^y рівна подвоєній глибині залягання у випадку однорідного простору і, у випадку тришарового середовища, є монотонно зростаючою функцією h при фіксованому значенні s .

В результаті аналізу проведених чисельних розрахунків встановлено, що в загальному випадку рух середовища приводить до зміни структури ЕМП, які полягають в появі складових векторів поля, які відсутні в нерухомому середовищі. Ці зміни в кожний момент часу пропорційні абсолютній величині вектора $\vec{u}(t)$, якщо компоненти вектора є повільнозмінними функціями часу.

Показано, що абсолютні значення інформаційних сигналів, викликані рухом морського середовища і сферичної неоднорідності для деяких варіантів ПС, є співмірні. Зменшення впливу руху морського середовища на сигнали ПС можна досягнути шляхом збільшення несучої частоти або відстані між ДП і ПП, чи вибором структури (геометрії) ПС.

В додатку приведено означення та загальні властивості векторних хвильових функцій.

ВИСНОВКИ

1. Уточнено поняття інформаційного (корисного) сигналу стосовно ПС МЕР низькочастним полем. Інформаційний сигнал розглядається як функціональна залежність від часу параметрів модуляції складових векторів ЕМП, викликані наявністю об'єктів пошуку. Прийнята модель, згідно якої сигнал розглядається як низькочастотний.

Для проведення математичного моделювання інформаційних сигналів обґрунтовано вибір моделей реальних джерел (електричний і магнітний диполі та нитка струму) і приймачів ЕМП, які використовуються в ПС МЕР, а також моделей об'єктів пошуку (однорідна куля) і оточуючого його середовища (нерухомий і рухомий безмежний однорідний простір, дво- і тришаровий простір з плоскопаралельними площинами розділу).

2. Розроблено метод математичного моделювання характеристик ЕМП у рухомому середовищі, вектор швидкості руху якого

залежить тільки від часу. Виходячи з основних положень електродинаміки рухомих середовищ, отримано рівняння для векторного і скалярного потенціалів. Зокрема, виведено рівняння для вектор-потенціалу, що описує ЕМП осцилюючих джерел, коли компоненти вектора швидкості $\vec{v}(t)$ - повільно змінні функції часу. Для цього рівняння знайдені вирази дво- і тривимірної функції Гріна.

3. За допомогою запропонованого підходу отримано аналітичні вирази для обчислення характеристик ЕМП електричного і магнітного диполів та нитки струму. Показано, що в реальних умовах пошуку об'єктів в морському середовищі, отримані вирази можна зобразити у вигляді суми двох доданків: перший - це вираз для векторів поля в нерухомому середовищі, другий - описує зміни ЕМП, які викликані рухом середовища, і є пропорційним малому безрозмірному параметру $ca/cv \ll 1$.

4. Для побудови математичної моделі вторинного ЕМП сферичної неоднорідності в тришаровому середовищі, без обмежень на електродинамічні і геометричні параметри, отримана НСЛАР для коефіцієнтів розкладу векторів ЕМП, обумовленого неоднорідністю, за векторними хвильовими функціями в сферичній системі координат.

5. Показано, що отримана НСЛАР має єдиний розв'язок у випадку, коли сферична неоднорідність не дотикається до границь розділу однорідних середовищ. Методом малого параметру знайдено її наближений розв'язок для малої сферичної неоднорідності (радіус сфери значно менший за довжину ЕМ хвилі в оточуючому середовищі).

6. На основі побудованих математичних моделей розроблено ППП для обчислення параметрів ЕМП і інформаційних сигналів ПС МЕР. За допомогою розробленого пакету програм проведено аналіз особливостей вторинного ЕМП і відповідних корисних сигналів малої неоднорідності сферичної форми для різних моделей оточуючого середовища. Показано, що для моделювання кількісних характеристик інформаційних сигналів ПС МЕР не можна нехтувати впливом границь розділу "повітря - морська вода" і "морська вода - дно".

7. Встановлено закономірності залежностей параметрів векторів вторинного ЕМП сферичної неоднорідності від глибини залягання і положення в плані. Ці закономірності дозволяють визначити місцеположення локальної неоднорідності в морському середовищі.

8. Здійснено оцінку впливу руху морського середовища на ЕМП електричного і магнітного диполів та нитки струму. Показано, що абсолютні значення сигналів, викликані рухом морського середовища і сферичної неоднорідності, для деяких варіантів ПС є співмірні. Зменшення впливу морських течій на сигнали ПС можна досягнути шляхом збільшення несучої частоти або відстані між ДП і ПП та вибором структури (геометрії) ПС.

Основний зміст дисертації викладено в роботах:

1. Гордиенко В.И., Кулыныч Я.П., Убогий В.П. Моделирование электромагнитных полей в морской среде. - Киев: Наукова думка, 1988. - 222 с.

2. Гордиенко В.И., Заяц В.М., Кулыныч Я.П. Электромагнитное поле дипольного излучателя в медленно движущейся проводящей среде//Математические методы и физико-механические поля.- 1988.-Вип.28. С.31-35.

3. Гордиенко В.И., Заяц В.М., Кулыныч Я.П. Электромагнитное поле движущегося диполя в проводящей среде//Отбор и обработка информации.- 1989.-Вип.3(79).- С.22-25.

4. Гордиенко В.И., Заяц В.М., Кулыныч Я.П. Расчет электромагнитного поля в медленно движущейся, проводящейся и неограниченной среде//Отбор и обработка информации. -1991. Вип. 7(83). - С.49-54.

5. Гордиенко В.И. Кулыныч Я.П. Переменное электромагнитное поле в неравномерно движущейся среде//Изв. Вузоа. Электромеханика.- 1991.-№ 8.-С.34-35.

6. Кулыныч Я.П., Убогий В.П. Поле конечного кабеля в плоскостной среде в присутствии сферической неоднородности//Материалы X конф. молодых ученых ФМИ АН Украины. - Львов.- 1981. - Деп. в ВИНТИ №1077-83 Деп. - С. 68-70.

7. Gordienko V.I., Zayats V.M., Kulynych Ya.P. Mathematic modelling of electromagnetic fields in moving media//The integration of purpose specialists' training systems and automation technical systems of various purpose: The international conference, Alushta, 15-20 oct., 1990: The theses of reports.- Moscow.-1990.-P.49.

Особистий внесок. Всі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях написаних у співавторстві, дисертантові належать: в [1] - побудова та дослідження математичної моделі вторинного ЕМП

сферичної неоднорідності в тришаровому середовищі, розробка методу побудови математичної моделі ЕМП в повільно рухомих середовищах на основі рівнянь Максвелла-Мінковського та програмне забезпечення для проведення чисельного моделювання ЕМП та інформаційних сигналів ПС МЕР; в [2] - побудова розв'язку математичної задачі визначення ЕМП в повільно рухомому середовищі; в [3] - ідея зведення задачі визначення ЕМП рухомого диполя до задачі визначення ЕМП нерухомого диполя в рухомому середовищі; в [4] - аналітичні описи компонент векторів ЕМП диполя в рухомому середовищі; в [5] - математична модель ЕМП осцилюючих джерел в нерівномірно рухомому середовищі; в [6]- побудова розв'язку математичної задачі визначення ЕМП в тришаровому середовищі з двома горизонтальними граничними площинами, середній шар якого містить джерело ЕМП - довільно орієнтований електричний (магнітний) диполь і неоднорідність сферичної форми; в [7] - підхід до чисельного аналізу поля в повільно рухомому середовищі.

Кулинич Я.П. Математичне моделювання сигналів і електромагнітних полів пошукових систем морської електророзвідки. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи. - Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури, Львів, 1997.

Побудовано і досліджено математичну модель електромагнітного поля, зумовленого сферичною неоднорідністю в тришароватому середовищі. Отримано вирази для векторів вторинного електромагнітного поля, малої сферичної неоднорідності в полі електричного і магнітного диполів, нитки струму. Виходячи з рівнянь Максвелла-Мінковського розроблено математичну модель електромагнітного поля в повільно рухомих середовищах. Отримано аналітичні вирази для векторів поля електричного і магнітного диполів, нитки струму в рухомому середовищі. Досліджено характеристики електромагнітного поля і інформаційних сигналів, зумовлених малою сферичною неоднорідністю. Здійснено оцінку впливу руху середовища на електромагнітне поле різних типів джерел поля.

Ключові слова: математичне моделювання, електромагнітне поле,

пошукова система, морська електророзвідка, сферична неоднорідність, повільно рухоме шарувате середовище, метод розділення змінних.

Кульнич Я.П. Математическое моделирование сигналов и электромагнитных полей поисковых систем морской электроразведки. -Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы. -Государственный научно-исследовательский институт информационной инфраструктуры, Львов, 1997.

Построено и исследовано математическую модель электромагнитного поля, обусловленного сферической неоднородностью в трехслойной среде. Получены выражения для векторов вторичного электромагнитного поля малой сферической неоднородности в поле электрического и магнитного диполей, нити тока. Исходя из уравнений Максвелла-Минковского разработана математическая модель электромагнитного поля в медленно движущейся среде. Получены аналитические выражения для векторов поля электрического и магнитного диполей, нити тока в движущейся среде. Исследованы характеристики электромагнитного поля и информационных сигналов, обусловленных малой сферической неоднородностью. Проведена оценка влияния движения среды на электромагнитное поле различных типов источников поля.

Ключевые слова: математическое моделирование, электромагнитное поле, поисковая система, морская электроразведка, сферическая неоднородность, медленно движущаяся слоистая среда, метод разделения переменных.

Kulynych Ya.P. Mathematical Modelling of Signals and Electromagnetic Fields of Search Systems in the Sea. - Manuscript.

Thesis for a candidat's degree by speciality 01.05.02 - Mathematical Modelling and Calculating Methods. -State Scientific and Research Institute of Information Infrastructure, Lviv, 1997.

Mathematical model of electromagnetic field caused by spherical inhomogeneity in three-layered environment has been built and

investigated. Expressions for vectors of the secondary electromagnetic field of the small spherical inhomogeneity in the field of electric and magnetic dipoles, thread of current have been obtained. Proceeded from Maxwell-Minkovsky equations mathematical model of electromagnetic field in slowly moving environment has been built. Responses of electromagnetic field and informational signals caused by small spherical inhomogeneity were explored. Valuation of influence of the movement of environment on the electromagnetic field of different types of sources has been done.

Key words: mathematical modelling, electromagnetic field, search system, sea, spherical inhomogeneity, slow moving layered environment, method of separation of variables.



Підп. до друку 2.11.97р. Формат 60x84/16 Папір 80г/м² Друк офсетний
Умовн. друк. арк. Обл. вид. арк. Зам. № 530 Тираж 100

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Льв ЦНТЕІ

Ac 38 CT 6

AB 38.776