

УДК 621.371:550.837.6

**ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД
УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ В РЕЖИМЕ
РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ**

В. Ф. Янушкевич

Полоцкий государственный университет, 11440, Беларусь, Новополоцк, Блохина, 29

Статья поступила в редакцию 5 августа 2017 г.

Аннотация. В статье приводится анализ поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. Выведены компоненты поверхностного импеданса анизотропной среды над залежью в режиме радиоимпульсных сигналов на основе квазигидродинамического подхода с использованием многочастичных электронно-ионных токов. Проведен анализ амплитуд и фаз компонентов поверхностного импеданса среды над углеводородами. Показано, что результаты исследований могут быть использованы для идентификации среды над залежами по характеру и величине амплитуд и фаз компонентов поверхностного импеданса анизотропного слоя.

Ключевые слова: радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, поверхностный импеданс.

Abstract. The article analyzes the surface impedance of the medium over hydrocarbon deposits in the regime of radiopulse signals. The components of the surface impedance of an anisotropic medium above the deposit in the mode of radiopulse signals are derived on the basis of the quasihydrodynamic approach using multiparticle electron-ion currents. The amplitude and phase analysis of the components of the surface impedance of the medium over hydrocarbons is undertaken. It is shown that the results of the investigations can be used to identify the environment over deposits by the nature and magnitude of the amplitudes and phases of the components of the surface impedance of the anisotropic layer. The components of the surface impedance of anisotropic media above hydrocarbon

deposits in the mode of radio-pulse signals can be determined in a wide range of probed signals frequencies, dielectric permittivities and conductivities of the media.

The frequency response of the surface impedance component is determined to possess the resonance points in which the amplitude of the medium resistance over hydrocarbon deposits has a pronounced minimum that can be used to identify the media.

When the dielectric constant of the medium changes, the components of the surface impedance change with the alteration of both sign of the amplitude and phase of the component, which can be used to develop methods for electromagnetic exploration, search and identification of hydrocarbon deposits.

The analysis of the interaction of impulse signals with the medium over hydrocarbon deposits showed that the components of the surface impedance possess both capacitive and inductive character of the resistance. All these lead to the expansion of the functional dependences of the components of the surface impedance on the probing modes, which makes possible to improve the accuracy of the hydrocarbon deposit search methods being developed. Electromagnetic methods for the search and identification of hydrocarbons can be improved by obtaining information about objects not only through one or two information channels, but also through the larger amount of them, which allows us to identify hydrocarbon boundaries against the backdrop of the underlying medium with a sufficiently high level of reliability. The results of the study can be applied in search geophysics.

Key words: radiopulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposit, surface impedance.

1. Введение

Актуальность рассматриваемых в данной работе задач связана с усовершенствованием существующих в настоящее время электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), направленных на добычу стратегического вида полезных ископаемых и позволяющих определять

широкий спектр глобальных экологических вопросов современного общества. Разработка методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) базируется на изучении электрофизических и электрохимических процессов в анизотропных средах (АС) над залежами углеводородов, определении наиболее существенных эффектов, позволяющих дифференцировать свойства сред и выделять критерии диагностики УВЗ [1]. Существующие решения при изучении плазмы и плазмоподобных сред на основе аналогии исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием могут быть применены для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ [2]. В работе [1] показано, что квазигидродинамический подход на основе многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений является наиболее оптимальным для исследования сред над УВЗ ввиду отсутствия необходимости учета точных пространственно-временных перемещений частиц. Выбор метода электроразведки основывается на надежной, достоверной базе уникальной информации об установленных на данный момент сведениях о свойствах УВЗ и оптимизации частотных, поляризационных, амплитудных, модуляционных и других параметров зондирующих сигналов с учетом специфических характеристик УВЗ.

Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах. В статье [3] обнаружение углеводородов осуществляется по изменению поверхностного импеданса среды над залежами в режиме частотно-модулированных сигналов. В работе [4] были предложены новые решения к ближнеполевой СВЧ диагностике подповерхностных неоднородностей с субволновой разрешающей способностью, основанный на использовании импульсного зондирующего сигнала, в котором глубинную чувствительность определяет временная зависимость рассеянного импульса. Были предложены и апробированы в эксперименте методы томографии и голографии (определения формы) подповерхностных диэлектрических объектов, основанные на двумерном сканировании вдоль поверхности среды той же самой приемно-передающей

системой, представляющей собой жестко связанные передатчик и приемник, что и в ранее опубликованных авторами методах многочастотной ближнепольной СВЧ диагностики [5]. Результаты данных исследований применены для диагностики песчаных сред, что может быть использовано при оконтуривании сред над УВЗ. Точность определения границ УВЗ может быть улучшена за счет исследования тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ [6], применением методов электрорезонансного зондирования [7]. В работе [8] проведен анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ в режиме гармонического сигнала с учетом влияния всех ниже расположенных слоев на верхний слой. Основой многих методов георазведки углеводородов могут стать результаты исследования затухания радиоимпульсных сигналов в среде над залежью [9]. Способ поиска УВЗ [10] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Целью настоящей работы является качественное повышение уровня достоверности поиска и идентификации УВЗ обоснованием выбора характеристик ЭМВ при использовании радиоимпульсных сигналов на основе анализа поверхностного импеданса АС над углеводородами.

Новизна исследований, приведенных в данной статье, заключается в том, что полученные результаты способствуют обнаружению УВЗ по величине отличий компонентов поверхностного импеданса АС по сравнению с однородными средами .

2. Взаимодействие АС с УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме импульсного сигнала вида:

$$U(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота; ω_0 – несущая частота; $\tau_{\text{и}}$ – длительность радиоимпульса. Амплитуду радиоимпульса пронормируем, т.е. положим $\frac{U \cdot \tau_{\text{и}}}{2} = 1$.

Импедансные граничные условия имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} E_x &= -Z_0(\dot{Z}_{11}\dot{H}_x - \dot{Z}_{12}\dot{H}_y), \\ E_y &= -Z_0(\dot{Z}_{21}\dot{H}_x - \dot{Z}_{22}\dot{H}_y), \\ \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L}), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= -\frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_{x,y}, H_{x,y}$ – проекции падающей и отражённой волны на соответствующие координатные оси;

\dot{Z}_0 – характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность;

$\dot{Z}_{11}, \dot{Z}_{12}, \dot{Z}_{21}, \dot{Z}_{22}$ – компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ,

$\dot{\epsilon}_R = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_L = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$, где $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$ – элементы матрицы [3]:

$$\dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ в выражениях (2) представим в виде:

$$\dot{Z}_{11} = |\dot{Z}_{11}| \cdot \exp(j \cdot \varphi_{z11}), \dot{Z}_{12} = |\dot{Z}_{12}| \cdot \exp(j \cdot \varphi_{z12}), \quad (4)$$

где $|\dot{Z}_{11}|$, $|\dot{Z}_{12}|$, φ_{z11} , φ_{z12} – соответственно модули и фазы составляющих поверхностного импеданса. Учитывая (2), величины $|\dot{Z}_{21}|$, $|\dot{Z}_{22}|$, φ_{z21} , φ_{z22} будут определяться выражениями (4).

Компоненты поверхностного импеданса выражают соотношения между составляющими напряженностей электрического и магнитного полей при

распространении ЭМВ в данной среде. Теоретический анализ данных характеристик и их экспериментальное исследование несет высокую информативность ЭММ поиска, оконтуривания и идентификации УВЗ.

Использование радиотехнических систем с возможностью вариации характеристик зондирующих ЭМВ в широких пределах расширяет возможности георазведки, основываясь на выделении аномальных эффектов при распространении радиоволн над данной средой.

Процесс взаимодействия ЭМВ со средой над УВЗ можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами $\varepsilon_0, \mu_0, \delta_0$ на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Возбуждение данной ЭМВ осуществляется с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля. Выведем компоненты поверхностного импеданса АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов в рамках квазигидродинамического приближения, уравнение движения электрона для которого имеет вид:

$$m \frac{d\dot{\mathcal{G}}}{dt} + \nu m \dot{\mathcal{G}} = q \dot{E} + q \mu_0 \left[\dot{\mathcal{G}}, \dot{H}_0 \right], \quad (5)$$

где $m, q, \dot{\mathcal{G}}$ – масса, заряд и скорость движения частиц, ν – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, \vec{E} – напряженность электрического поля ЭМВ, \dot{H}_0 – напряженность магнитного поля Земли. Заряд электрона равен элементарному заряду $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Определив составляющие скоростей $\mathcal{G}_x, \mathcal{G}_y, \mathcal{G}_z$ из выражений (5), найдём плотность полного тока в немагнитной анизотропной среде (μ_t – магнитная проницаемость исследуемой среды не отличается от μ_0)

$$\dot{\delta}_{\Sigma} = \dot{\delta}_{CM} + \dot{\delta}_{ПП} = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \dot{E} + \sum_{i=1}^N q_i \cdot N_i \cdot \dot{\mathcal{G}}_i, \quad (6)$$

которая определяется токами в диэлектрическом наполнителе среды с проницаемостью ϵ_r ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума) и включает ток проводимости $\delta_{\text{пр}}$ с известной концентрацией электронов N_e .

Учитывая, что гиротропная частота

$$w_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu_0 H_0}{m_i}, \quad (7)$$

плазменная частота определяется

$$w_{ni} = q_i \left(\frac{N_i}{m_i \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$i = 1$ для электронов, $i = 2$ для ионов,

δ_r – удельная проводимость среды,

получим

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{\delta}_x &= j\omega\epsilon_0 E_x \left\{ \left[\epsilon_r \cdot F \cdot \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \frac{\delta_r \cdot F}{w \cdot \epsilon_0} \right] - j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \frac{j(w + n\Omega_1) + \nu}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\} + \\ &+ jw\epsilon_0 E_y \cdot \left[j \frac{w_{ni}^2 \cdot w_{\Gamma i} \cdot F}{w} \cdot \frac{1}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right], \\ \vec{\delta}_y &= j\omega \epsilon_0 E_y \left[\frac{w_{ni}^2 \cdot F \cdot w_{\Gamma i}}{w} \cdot \frac{1}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right] + \\ &+ jw\epsilon_0 E_x \left\{ \left[\epsilon_r F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \frac{\delta_r \cdot F}{w\epsilon_0} \right] - j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{F \cdot j(w + n\Omega_1) + \nu}{[j(w + n\Omega_1) + \nu]^2 + w_{\Gamma i}^2} \right\}, \\ \vec{\delta}_z &= j\omega_2 \epsilon_0 E_z \left[\epsilon_r \cdot F \cdot \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) - j \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot \frac{1}{j(w + n\Omega_1) + \nu} + \frac{\delta_r \cdot F}{w\epsilon_0} \right] \right]. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\text{Здесь } F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

T, F_1, n – период, частота импульса и номер гармоники, $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$.

Координатное разложение напряжённости электрического поля с учётом (9) позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{F \cdot w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{(w + n\Omega_1) \cdot [w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &- jF \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot v_i \cdot \frac{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{w\varepsilon_0} \right] \end{aligned} \right\}, \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot \frac{v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ &- 2j \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot \frac{w + n\Omega_1}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{aligned} \right\}, \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) \cdot \left[\varepsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w\varepsilon_0} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Таким образом, компоненты поверхностного импеданса могут быть определены на основе анализа выражений (2), (4), (10).

3. Результаты исследований

Расчет компонентов поверхностного импеданса среды над УВЗ осуществлен на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [1]: удельная электрическая проводимость $\delta_r = 0.5$ См/м; концентрация частиц $N_e = N_{\text{и}} = 10^{15} \text{ м}^{-3}$; частота столкновения частиц $\nu = 10 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад / с. Значение n выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 25. Поскольку значение модуля поверхностного импеданса не несет информацию об характере сопротивления, рассчитывались амплитудные значения, т.е. $|\dot{Z}_{11}| = Z_{11}$, $|\dot{Z}_{12}| = Z_{12}$.

На рис.1 представлены зависимости $Z_{11} = \psi(f)$. Следует иметь ввиду, что согласно выражений (2) для получения значений поверхностного импеданса среды над УВЗ нужно значения амплитуды умножать на Z_0 . В диапазоне частот от $2 \cdot 10^8$ Гц до $10 \cdot 10^8$ Гц сопротивление среды практически постоянно, за исключением значения диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 25$, когда наблюдается незначительное изменение в сторону уменьшения величины поверхностного импеданса. С точки зрения информативности наибольший интерес представляет начальный участок частотного диапазона ($0 - 2 \cdot 10^8$) Гц, когда происходит изменение амплитуды поверхностного импеданса от $-20 \cdot 10^{-7}$ Ом до 0 Ом, т.е. величина сопротивления носит емкостной характер. Наблюдаются резонансные точки, когда амплитуда поверхностного импеданса имеет ярко выраженный минимум, например для диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 25$ это происходит на частоте $0,03 \cdot 10^8$ Гц.

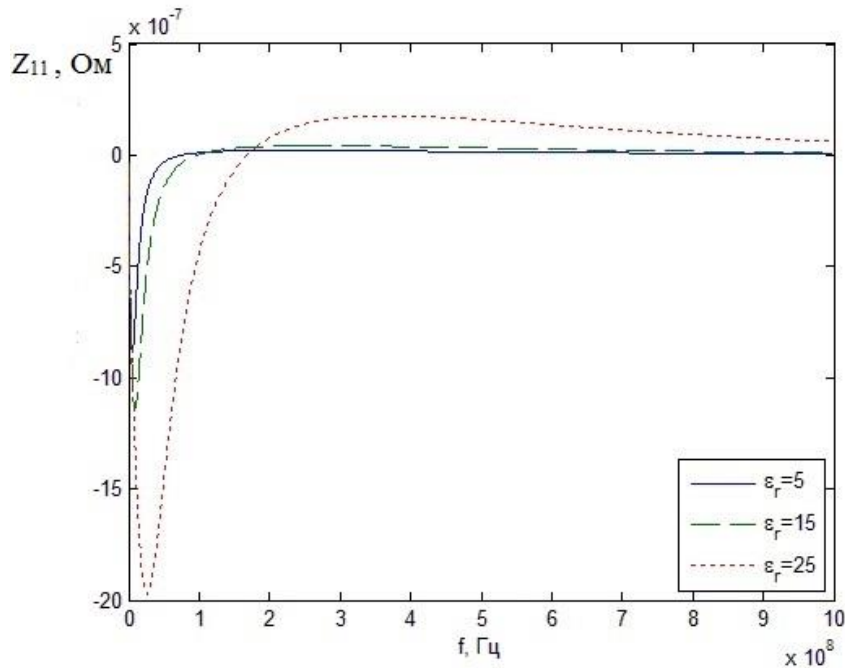


Рис.1. Зависимости $Z_{11} = \psi(f)$

На рис.2 представлены зависимости $Z_{12} = \psi(f)$. Заметно, что значения поверхностного импеданса среды над УВЗ для данной компоненты значительно превышают величину Z_{11} . В диапазоне частот от $1 \cdot 10^8$ Гц до $10 \cdot 10^8$ Гц сопротивление среды практически постоянно, причем для всех значений

диэлектрической проницаемости АС. Для идентификации сред наибольший интерес представляет начальный участок частотного диапазона ($0 - 1 \cdot 10^8$) Гц, когда происходит изменение амплитуды поверхностного импеданса от 0,4 Ом до 1,6 Ом, причем величина сопротивления носит индуктивный характер. Наблюдаются точки стабилизации величины сопротивления, когда амплитуда поверхностного импеданса становится постоянной на частоте порядка $1 \cdot 10^8$ Гц.

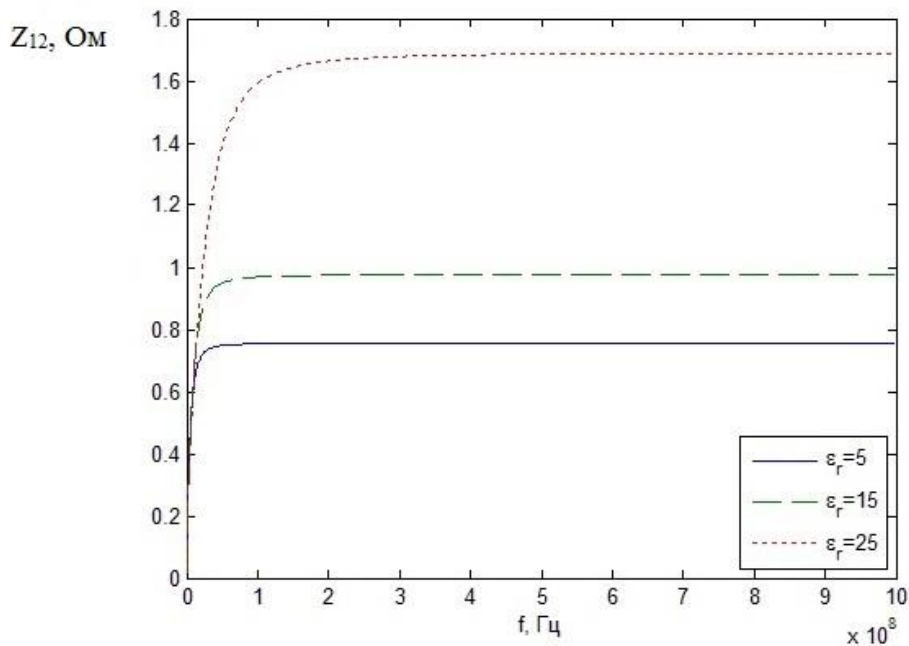


Рис.2. Зависимости $Z_{12} = \psi(f)$

На рис.3 представлены зависимости фазы компоненты поверхностного импеданса Z_{11} . В диапазоне частот от $0,03 \cdot 10^8$ Гц до $10 \cdot 10^8$ Гц фаза постепенно уменьшается до нуля, при этом диэлектрическая проницаемость наполнителя незначительно влияет на ее изменение. С точки зрения информативности наибольший интерес представляет начальный участок частотного диапазона ($0 - 0,03 \cdot 10^8$) Гц, когда происходит скачкообразное изменение фазы компоненты поверхностного импеданса. Точки перебрасывания фазы смещаются с ростом ϵ_r вправо по частотной оси.

На рис.4 представлены зависимости фазы компоненты поверхностного импеданса Z_{12} . Характерно, что в диапазоне частот от 0 Гц до $10 \cdot 10^8$ Гц фаза

постепенно уменьшается до нуля, при этом диэлектрическая проницаемость наполнителя влияет на ее изменение. При этом для значений диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = (1 - 15)$ наиболее существенно изменение фазы на начальном участке частотного диапазона $(0 - 2 \cdot 10^8)$ Гц. Для значений диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = (15 - 25)$ наиболее существенно изменение фазы на начальном участке частотного диапазона $(0 - 4 \cdot 10^8)$ Гц .

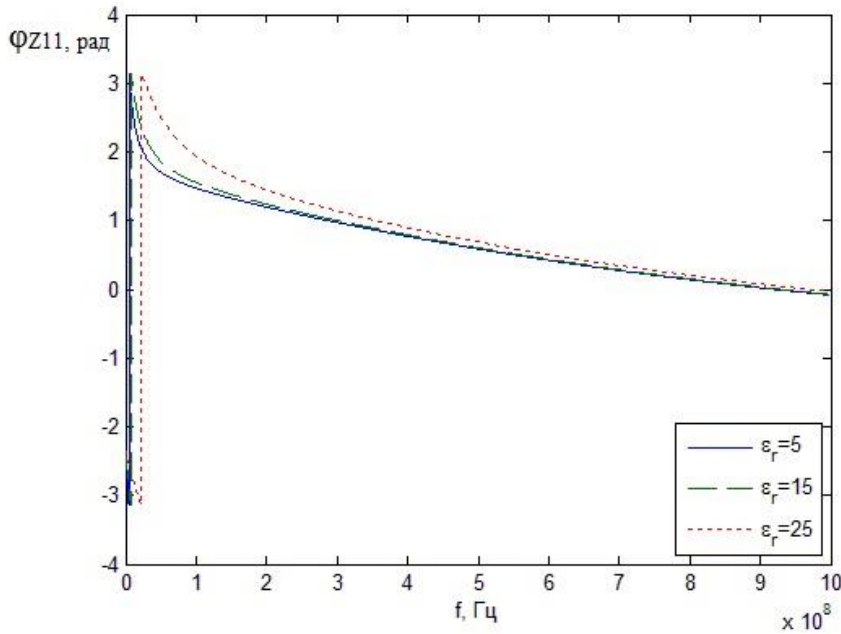


Рис.3. Зависимости $\varphi_{Z11} = \psi(f)$

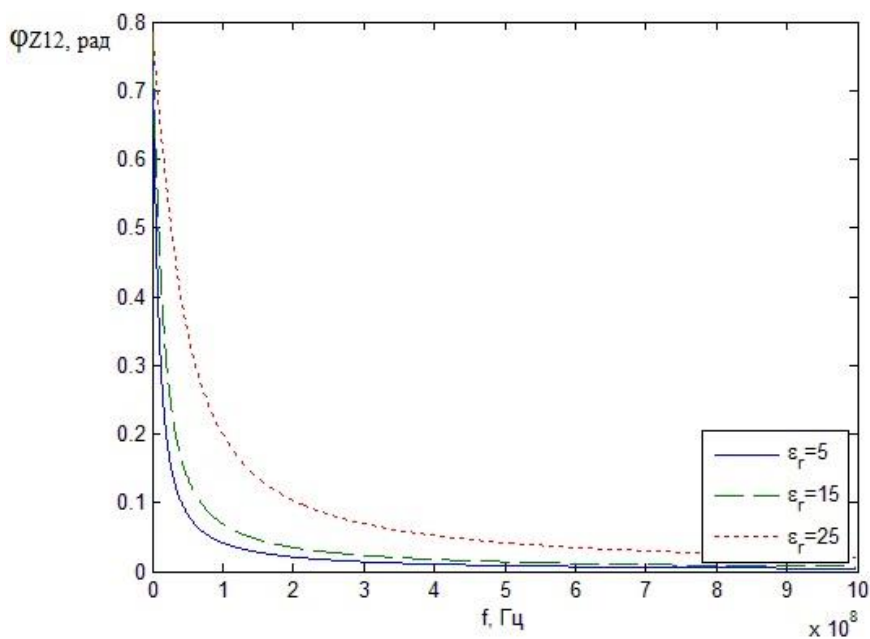


Рис.4. Зависимости $\varphi_{Z12} = \psi(f)$

Распространение ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов может быть использовано для разработки методов электромагнитной разведки, поиска и идентификации УВЗ, поскольку при изменении диэлектрической проницаемости среды происходит изменение составляющих поверхностного импеданса с изменением знака амплитуды и фазы компоненты Z_{11} . Исследование процессов распространения ЭМВ вблизи точки перехода данных величин через нуль связано с аномальным поведением напряженности электрического поля, различными резонансными эффектами и может быть применено для поиска и идентификации УВЗ.

По величине поверхностного импеданса среды над УВЗ можно проводить оценку характеристик антенн, имеющих фиксированное положение в пространстве, относительно границы раздела сред при изменении свойств подстилающей поверхности. Это дает возможность количественной оценки свойств среды, не прибегая к точному расчету изменений электродинамических параметров подстилающей поверхности.

4. Заключение

Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя над УВЗ с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Выведены компоненты поверхностного импеданса АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть исследованы в поисковой геофизике. При этом следует отметить:

- компоненты поверхностного импеданса АС над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов могут быть определены в широком диапазоне частот зондируемых сигналов, диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей сред;

- частотная характеристика компоненты поверхностного импеданса Z_{11} обладает резонансными точками, в которых амплитуда сопротивления среды над УВЗ имеет ярко выраженный минимум, что может быть использовано для идентификации сред.

– при изменении диэлектрической проницаемости среды происходит изменение составляющих поверхностного импеданса с изменением знака амплитуды и фазы компоненты Z_{11} , что может быть использовано для разработки методов электромагнитной разведки, поиска и идентификации УВЗ;

– проведенный анализ взаимодействия импульсных сигналов со средой над УВЗ показал, что компоненты поверхностного импеданса Z_{11} , Z_{12} обладают соответственно емкостным и индуктивным характером сопротивления. Все это приводит к расширению функциональных зависимостей компонентов поверхностного импеданса от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

Литература

1. Гололобов Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. // Минск. Бестпринт. 2009. С.185.
2. Гололобов Д.В. Поиски, разведка и мониторинг залежей нефти, газа и угля радиоволновым методом. / Д.В. Гололобов, А.А. Кураев, Ю.Н. Стадник // Геологической службе России 300 лет; тез. докл. Междунар. геофиз. конф. Санкт-Петербург, 2 – 6 окт. 2005. (ВИРГ – Рудгеофизика: А.А. Петров [и др.]). СПб., 2005, С.171.
3. Гололобов Д.В., Калинин С.В., Янушкевич В.Ф. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. Минск 2010. № 4. С. 98 – 101.
4. Гайкович К.П., Максимович Е.С. Ближнеполюсная импульсная СВЧ диагностика подповерхностных диэлектрических неоднородностей. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016, №2. URL <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/4/text.pdf>.
5. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. Inverse problem of near-field scattering in multi-layer media. // Inverse Problems, 2010, Vol.26, No. 12, p. 125013.

6. Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20-22, 1991. Vol. 1. pp. 240-244.
7. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations / S. P. Levashov // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003 (CD-ROM Abstracts volume).
8. Adamovskiy E., Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research. In 3 Parts. – Part 3. TECHNOLOGY. – PSU, Novopolotsk, 2016. V. 179 – 183.
9. Янушкевич В.Ф., Кременя К.И., Иванов М.М., Молодечкина Т.В. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. Вестник ПГУ. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. Новополоцк, 2016. №12. С. 45 – 50.
10. Иванова К.И., Янушкевич В.Ф. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. Материалы XV Международной НТК. 4 октября 2016г. Том 1. Санкт – Петербург. С.107 – 111.

Ссылка на статью:

В. Ф. Янушкевич. Поверхностный импеданс анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/2/text.pdf>