

УДК 621.371:550.837.6

## ИМПЕДАНСНЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Д.В. ГОЛОЛОБОВ<sup>1</sup>, С.В. КАЛИНЦЕВ<sup>2</sup>, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

<sup>2</sup>Полоцкий государственный университет  
Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь

Поступила в редакцию 5 мая 2010

Представлены результаты теоретического анализа взаимодействия амплитудно-модулированных сигналов с углеводородной залежью. Даны рекомендации по разработке методов поиска углеводородных залежей.

*Ключевые слова:* углеводородная залежь, поверхностный импеданс, амплитудно-модулированный сигнал.

### Введение

Анализ воздействия амплитудно-модулированных (АМ) сигналов на анизотропную среду (АС), возникающую над углеводородными залежами (УВЗ), способствует эффективному применению электромагнитных методов (ЭММ) в системе геофизической разведки [1]. При этом преследуется цель по обоснованию выбора характеристик электромагнитных сигналов (ЭМС) с АМ, оптимизации методов и аппаратурных средств для качественного повышения производительности геологоразведочных работ.

В качестве исследуемых оценочных характеристик воздействия ЭМС на УВЗ используются импедансные граничные условия. Величина поверхностного импеданса позволяет проводить оценку характеристик и параметров антенн, что может быть использовано для идентификации залежей полезных ископаемых.

Исследования проведены в рамках квазигидродинамического приближения движения частиц в плотной среде над УВЗ [2].

### Теоретический анализ

Рассмотрим взаимодействие АМ-сигнала на АС:

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $E$  — амплитуда несущего колебания частоты  $\omega$ ;  $k_m$  — коэффициент амплитудной модуляции;  $\Omega = 2\pi F$  — частота модуляции.

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

где  $E_{x,y}$ ,  $H_{x,y}$  — тангенциальные составляющие электрического и магнитного поля на соответствующие координатные оси;  $\dot{Z}_0$  — характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность;  $\dot{\epsilon}_R = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_L = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$ , где  $\dot{\epsilon}_1$  и  $\dot{\epsilon}_2$  — элементы матрицы [2],

$$\dot{\epsilon} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_1 \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над УВЗ имеют вид [1]

$$\begin{aligned}
\dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \omega_{Pi}^2 \frac{\omega_{Gi}^2 - \omega^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2) + 4\omega^2\nu_i^2} + \\
&+ j \left[ \frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega + (1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 \nu_i}{\omega} \frac{\omega^2 + \nu_i^2 + \omega_{Gi}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2) + 4\omega^2\nu_i^2} \right], \\
\dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \omega_{Gi}}{\omega} \frac{\omega_{Gi}^2 - \omega^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\nu_i^2} - \frac{2j\nu_i \omega_{Pi}^2 \omega_{Gi}}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\nu_i^2} \right\}, \\
\dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{Pi}^2 \frac{1}{\nu_i^2 + \omega^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 \nu_i^2}{\omega} \frac{1}{\nu_i^2 + \omega^2} \right] \right\},
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость среды над УВЗ;  $\omega_{Pi}$ ,  $\omega_G$  — плазменная и гиротропная частоты;  $\nu_i$  — частота столкновений электрона с тяжелыми частицами;  $\sigma_r$  — удельная электрическая проводимость.

Расчёт компонентов поверхностного импеданса (2) проводился на основании экспериментально полученных данных над УВЗ [1]:

- диэлектрическая проницаемость вмещающих пород;  $\epsilon_r=10$
- удельная электрическая проводимость  $\sigma_r=0,03$  См/м;
- эффективные частоты столкновений: электронно-ионная  $\nu_e=10^9$  с<sup>-1</sup> и ионная  $\nu_i=0,5 \cdot 10^{-7}$  с<sup>-1</sup>.

### Результаты и их обсуждение

В работе исследованы частотные зависимости  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$  при изменении параметров АМ-сигнала в предположении равенства диагональных составляющих матрицы поверхностного импеданса. Из рис. 1 видно, что частотная характеристика  $Z_{11}=\varphi(f)$  имеет резонансный вид. При малых значениях частоты модуляции  $F$  всплеск составляющей  $Z_{11}$  происходит при малых значениях частоты несущего колебания  $f$ . Когда  $F=0,1$  МГц и  $k_m=0,1$  величина  $|Z_{11}|=1,8 \cdot 10^{-5}$ , что соответствует частоте  $f \approx 5$  МГц. При частоте модуляции 1 МГц и пятидесятипроцентной модуляции  $k_m=0,5$  наблюдается увеличение компоненты  $|Z_{11}|$  до  $3 \cdot 10^{-5}$  на частоте несущего колебания  $f=20$  МГц. Увеличение частоты модуляции до 10 МГц и  $k_m=1$  позволяет сместить резонансное значение  $f$  до величины 60 МГц. При этом  $|Z_{11}|$  до  $2,4 \cdot 10^{-5}$ .

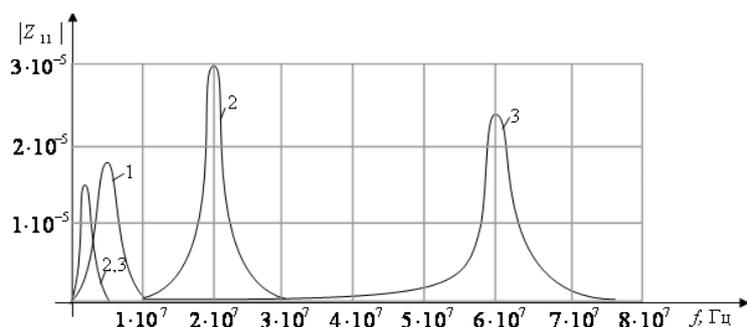


Рис. 1. Частотная характеристика  $|Z_{11}|$  при изменении частоты и коэффициента модуляции:  
 1 —  $F=0,1$  МГц,  $k_m=1$ ; 2 —  $F=1$  МГц,  $k_m=0,5$ ; 3 —  $F=10$  МГц,  $k_m=1$

Частотная зависимость модуля составляющей  $Z_{12}$  также является резонансной (рис. 2).

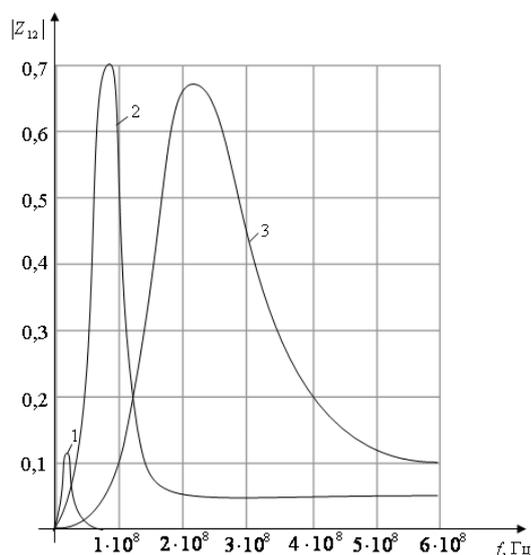


Рис. 2. Частотная характеристика  $|Z_{12}|$  при изменении частоты и коэффициента модуляции:  
 1 —  $F=0,1$  МГц,  $k_m=1$ ; 2 —  $F=1$  МГц,  $k_m=0,5$ ; 3 —  $F=10$  МГц,  $k_m=1$

При  $F=0,1$  МГц и  $k_m=1$  максимум  $|Z_{12}|=0,12$  наблюдается на частоте несущего колебания  $f=5$  МГц. Если увеличить частоту модуляции до 10 МГц при том же коэффициенте модуляции  $k_m=1$ , то происходит увеличение модуля  $Z_{12}$  до 0,7 на частоте  $f=80$  МГц. Дальнейшее увеличение частоты модуляции позволяет сместить резонансную частоту составляющей поверхностного импеданса  $Z_{12}$  на более высокую частоту. Так, при  $F=100$  МГц и  $k_m=0,5$  максимум значения  $|Z_{12}|$  равняется 0,65 на частоте  $f=220$  МГц.

Зависимость компонентов поверхностного импеданса от коэффициента амплитудной модуляции  $k_m$  не всегда является резонансной. Как видно из рис. 3, при малых значениях частоты модуляции компонента  $|Z_{11}|$  вариация  $k_m$  практически не влияет на его изменение. При увеличении  $F$  коэффициент амплитудной модуляции оказывает существенное влияние на величину модуля поверхностного импеданса. Если на частотах  $F=100$  МГц и  $f=1$  ГГц наблюдается резонансный всплеск  $|Z_{11}|$  до значения  $0,8 \cdot 10^{-4}$  при  $k_m=0,2$ , то в диапазоне значений  $k_m=0 \dots 0,1$  и  $k_m=0,3 \dots 1$  модуль компоненты поверхностного импеданса  $|Z_{11}|$  равен нулю.

Модуль составляющей  $Z_{12}$  (рис.4) при малых значениях  $F$  также практически не изменяется. При частоте модулирующего сигнала  $F=100$  МГц и несущей  $f=1000$  МГц имеется резонансный участок зависимости  $|Z_{12}|=\Psi(k_m)$ . Оптимальным при этом является коэффициент модуляции равный 0,2. При других соотношениях частот АМ-сигнала модуль компоненты  $Z_{12}$  не изменяется.

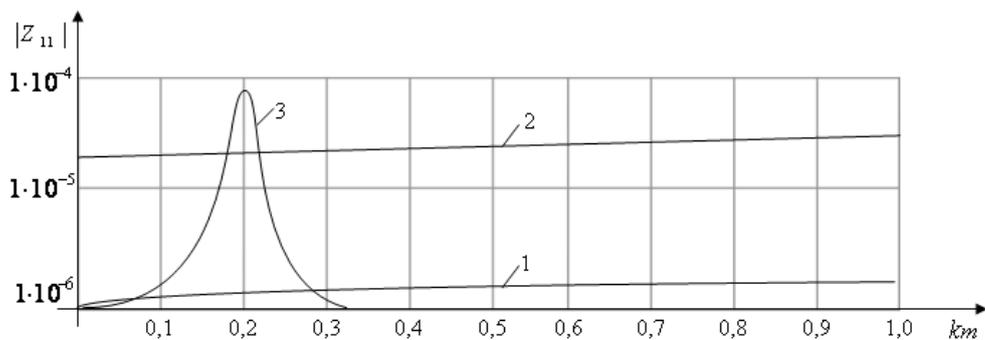


Рис. 3. Зависимости модуля  $|Z_{11}|$  от коэффициента модуляции:  
 1 —  $F=0,1$  МГц,  $f=1$  МГц; 2 —  $F=1$  МГц,  $f=10$  МГц; 3 —  $F=100$  МГц,  $f=1$  ГГц.

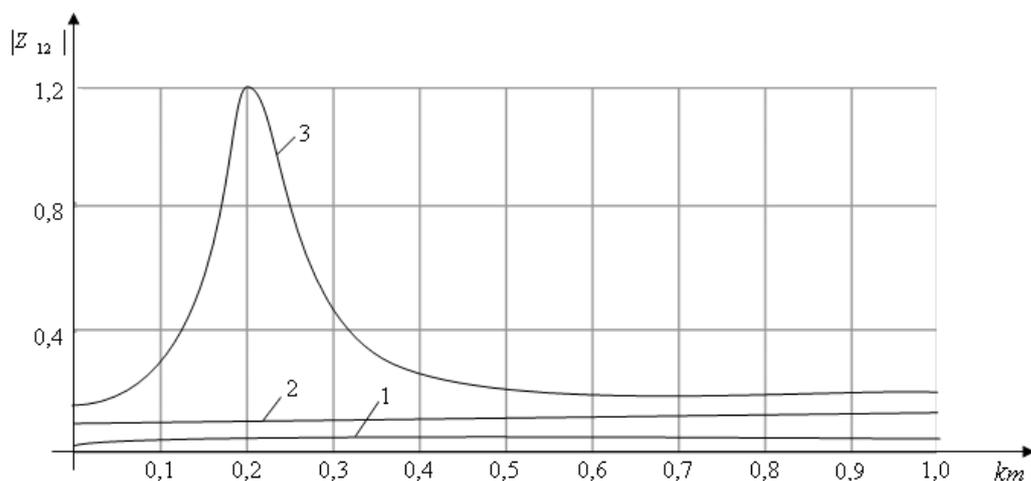


Рис. 4. Зависимости модуля  $|Z_{12}|$  от коэффициента модуляции:  
 1 —  $F=0,1$  МГц,  $f=1$  МГц; 2 —  $F=1$  МГц,  $f=10$  МГц; 3 —  $F=100$  МГц,  $f=1$  ГГц

### Заключение

Анализ полученных данных свидетельствуют о трансформации компонентов матрицы поверхностного импеданса при изменениях частоты несущего колебания и глубины модуляции АМ-сигнала. Эти характеристики имеют резонансный характер и зависят от соотношения частот несущего и модулирующего сигналов. Импедансные характеристики АС над УВЗ позволяют проводить качественную оценку электродинамических параметров сред посредством регистрации искажений характеристик и параметров антенных излучателей, находящихся в окрестности исследуемого объекта. Возможность изменения соотношения амплитуд и частот высокочастотного и низкочастотного колебания позволяет определить характерные признаки АС, обладающих конечными электродинамическими параметрами.

При диагностике АС с использованием ЭМС должна быть составлена электронная идентификационная таблица, позволяющая идентифицировать среду по приблизительному химическому составу исследуемого объекта в реальном масштабе времени. Очевидным при этом является сканирование по частоте как несущего, так и модулирующего колебания, а также временное изменение соотношений амплитуд сигналов, формирующих АМ-сигнал.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке радиотехнических систем ближней и дальней радиолокации для обнаружения локальных и плазменных образований, а также для оптимизации методов поиска и оконтуривания АС естественного и искусственного происхождения.

# IMPEDANCE BOUNDARY CONDITIONS FOR THE ENVIRONMENT ABOVE THE HYDROCARBON DEPOSITS IN THE AMPLITUDE-MODULATED SIGNAL MODE

D.V. GOLOLOBOV, S.V. KALINCEV, V.F. YANUSHKEVICH

## Abstract

The article presents the results of theoretical analysis of interaction of amplitude-modulated signals with hydrocarbon deposits. There are recommendations for the development of the methods of search of hydrocarbon deposits.

## Литература

1. Гололобов, Д. В., Янушкевич В.Ф., Рак А.О. // Инженерный вестник. 2005. №1(20).С.16–18.
2. Москвичев, В. Н. // Радиотехника и электроника. 1988. Вып. 18. С. 91–96.
3. Хаскинд, М. Д. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6, №6. С. 886–894.