

УДК 536.216

## ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АНИЗОТРОПНОГО СЛОЯ ПЛАЗМАПОДОБНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, Е.Ю. ЗАЯЦ, К.И. КРЕМЕНЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 2 июня 2015*

Проведен анализ входного импеданса анизотропного слоя плазмаподобного типа в режиме гармонического воздействия. Установлены закономерности изменения сопротивления диэлектрического слоя в широком частотно-глубинном диапазоне.

*Ключевые слова:* гармоническое воздействие, анизотропная среда, входное сопротивление, коэффициент отражения.

### Введение

Методы поиска и выделения анизотропных сред плазмаподобного типа (АСПТ) на определенном геологическом профиле земной поверхности основываются на дифференциации исследуемого участка по электромагнитным свойствам. Выявление аномалий электромагнитного поля (ЭМП) на данной территории позволяет производить измерения характеристик сред, сверяя их с определенными закономерностями идентификации геоэлектрического строения изучаемого профиля местности [1]. Исследование входного сопротивления АСПТ в режиме гармонического зондирования представляет практический интерес для разработки современных электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородных залежей (УВЗ).

### Отражение радиосигнала от АСПТ

С целью определения характеристик АСПТ был проведен анализ входного сопротивления анизотропного слоя, расположенного на высоте  $H$  над исследуемым месторождением нефти и газа (углеводородов) (рис. 1) в режиме гармонического воздействия

$$U(t) = U \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $U$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – соответственно амплитуда, круговая частота, начальная фаза зондирующего сигнала.

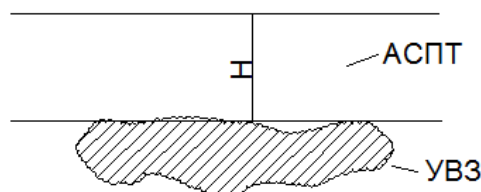


Рис. 1. Модель исследуемой АСПТ

Падение электромагнитной волны (ЭМВ) на диэлектрический слой (рис. 2) удобно рассматривать с позиций распределенных радиоэлектрических цепей [2], что дает возможность применить теорию длинных линий для расчета основных характеристик АСПТ.

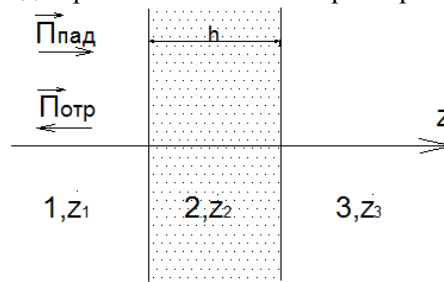


Рис. 2. Нормальное падение на диэлектрический слой

Нормальное падение ЭМВ с вектором Пойтинга  $\vec{P}_{\text{пад}}$  на слой среды протяженностью  $h$  сопровождается появлением отраженной волны со значением  $\vec{P}_{\text{отр}}$  и распространением волны в АСПТ. Сопротивление слоев определяется по формулам:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ Ом}, \\ \dot{z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_2}}, \\ \dot{z}_3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_3}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma}{\text{м}}$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi}{\text{м}}$ ,  $\epsilon_2, \epsilon_3$  – соответственно относительные диэлектрические проницаемости второй и третьей среды.

Эквивалентная схема для данного случая распространения согласно теории распределенных радиотехнических цепей представлена на рис. 3. Входное сопротивление слоя, сопротивление второго слоя и среды, от которой происходит отражение ЭМВ представлены в виде соответствующих сопротивлений омического характера, что дает очевидные преимущества теории цепей при расчетах.

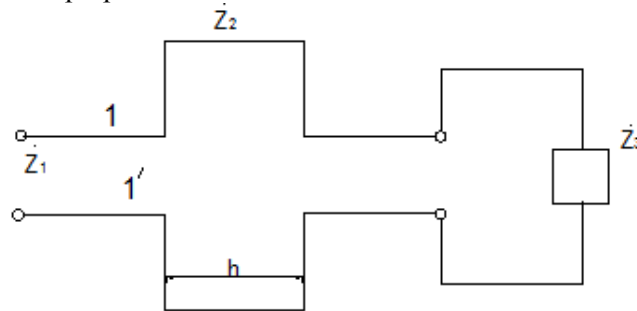


Рис. 3. Эквивалентная схема из отрезков линий передачи

Расчет входного сопротивления слоя  $H$  в таком случае сводится к определению входного сопротивления эквивалентной длинной линии в сечении 1-1. Значение сопротивления определяется согласно [3]:

$$z_{\text{вх}} = \frac{(\dot{z}_3 + \dot{z}_2) + (\dot{z}_3 - \dot{z}_2)e^{-2\gamma_2 h}}{(\dot{z}_3 + \dot{z}_2) - (\dot{z}_3 - \dot{z}_2)e^{-2\gamma_2 h}} \cdot \dot{z}_2, \quad (3)$$

$$\text{где } \gamma_2 = \beta_2 - j\alpha_2 = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_2}. \quad (4)$$

В выражении (4) фигурируют коэффициенты фазы и затухания  $\beta_2, \alpha_2$ ,  $c$  – скорость света,  $f$  – частота ЭМВ, а диэлектрическая проницаемость второй среды определяется выражением [4, 5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2}}{\left[ 1 - j \frac{\omega_{\Gamma i}^2 + \omega^2 + v_i^2}{\omega_{\Gamma i}^2 - v_i^2 - \omega^2} \frac{v_i}{\omega} \right]} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_i^2} \frac{\omega_{\Gamma i}}{\omega} [\omega^2 - v_i^2 - \omega_{\Gamma i}^2 - j2\omega v_i] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}}{v_i^2 + \omega^2} \left[ 1 + j \frac{v_i}{\omega} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где  $\epsilon_r, \sigma_r$  – диэлектрическая проницаемость без учета анизотропии и удельная проводимость второй среды,  $\omega_{\Pi i}, \omega_{\Gamma i}, v_i$  – плазменная, гиротропная частоты и частоты столкновения частиц.

### Анализ входного сопротивления АСПТ на УВЗ

Был проведен анализ входного сопротивления слоя 2 (рис. 2) в частном диапазоне от 0 до 15 МГц для глубин залегания УВЗ в пределах от 500 до 5000 м (рис. 4, 5).

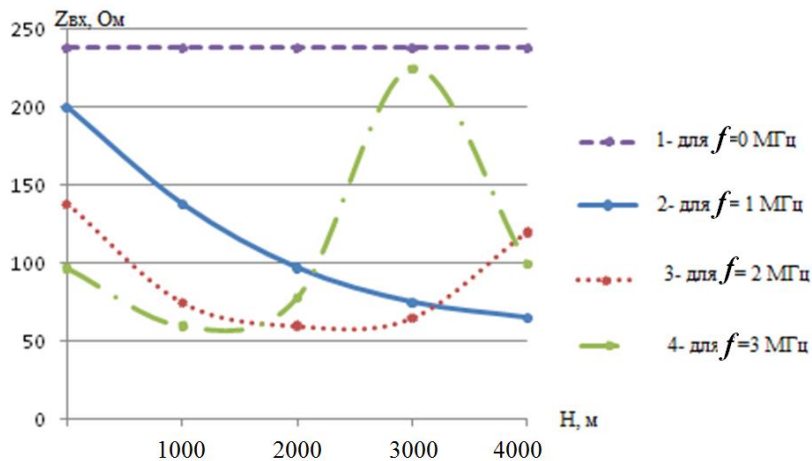


Рис. 4. Входное сопротивление АСПТ

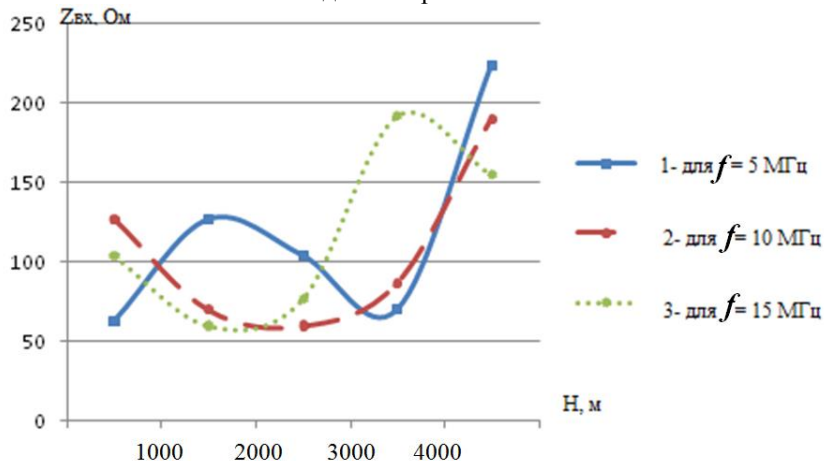


Рис. 5. Зависимость входного сопротивления АСПТ

Из рисунков видно, что на постоянном токе и при очень низких частотах входное сопротивление АСПТ постоянно или практически не изменяется. При увеличении частоты зондирующей ЭМВ входной импеданс снижается до значений (80–200) Ом на отрезке частот (1–3) МГц. Глубина залегания УВЗ оказывает влияние на сопротивление слоя 2. Вариация частоты ЭМВ при изменении величины  $H$  приведет к количественным изменениям входного сопротивления. Прослеживается следующая закономерность: входной импеданс уменьшается при значениях  $H = (500–2000)$  м. Месторождения нефти и газа, расположенные на больших глубинах, оказывают различное влияние на величину сопротивления для указанных выше частот. Использование частоты  $f = 1$  МГц приводит к уменьшению  $|z_{вх}|$ , на других частотах наблюдается рост входного импеданса. Следует отметить следующий факт: на частоте  $f = 3$  МГц при глубине  $H = 4000$  м  $|z_{вх}|$  приближается к значению сопротивления на низких частотах.

Рис. 5 свидетельствует о частотно-глубинной зависимости входного сопротивления АСПТ. Наблюдаются точки экстремумов на отрезке частот  $f = (5–10)$  МГц. На глубинах залегания  $H = (3000–5000)$  м происходит рост величины  $|z_{вх}|$ , которая постепенно приближается к значению  $|z_{вх}| = 238$  Ом на низких частотах зондирующих ЭМВ.

Определив значения входного импульса АСПТ, можно оценить отражательную способность среды над УВЗ по формуле:

$$R = \frac{\dot{z}_{вх} - \dot{z}_2}{\dot{z}_{вх} + \dot{z}_2}. \quad (6)$$

Значения  $|R|$  приведены на рис. 6

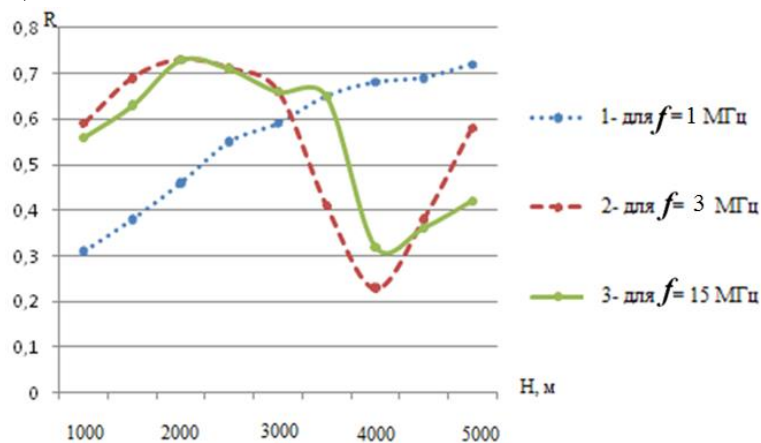


Рис. 6. Зависимости коэффициента отражения ЭМВ от АСПТ

Из рисунка видно, что глубина залегания  $H$  оказывает влияние на величину модуля коэффициента отражения. При использовании частот зондирования  $f = 3,15$  МГц наблюдаются минимумы отражения при глубине  $H = 4000$  м. Для частоты ЭМВ  $f = 1$  МГц происходит плавное увеличение модуля коэффициента отражения с ростом глубины залегания УВЗ. Следует отметить, что физико-химические процессы в самой залежи и в околозалежном пространстве, влияние углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ, состав кристаллического скелета и термодинамические условия залегания (давление и температура) приводят к дифференциации входного сопротивления АСПТ для различных месторождений.

Количественные проявления этих эффектов определяются физико-геологическими свойствами пород-коллекторов: гранулометрическим и минералогическим составом пород, структурно-текстурными особенностями скелета, характером пористости и проницаемости, видом цементирующего вещества и механическими свойствами скелета, количеством пластовой воды в порах и ее минерализацией и т.д. С учетом этих факторов, применяя радиотехнические системы поиска и выделения углеводородов в широком частотном диапазоне, можно достичь высокого уровня точности обнаружения залежей.

## Заключение

Проведен анализ входного сопротивления анизотропного слоя плазмаподобного типа в режиме гармонического воздействия. Распространение ЭМВ в диэлектрическом слое проведено на основе теории распределенных радиотехнических цепей. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ. Оптимизация частотных, поляризационных, амплитудных параметров зондирующих сигналов возможна с учетом специфических характеристик УВЗ, позволяющих в совокупности повысить уровень идентификации углеводородов до требуемого уровня, определяющего порог принятия решения о наличии именно искомой среды, определяемой как УВЗ. Результаты исследования могут быть исследованы в поисковой геофизике.

## ENTRANCE RESISTANCE OF THE PLAZMA-LIKE TYPE ANISOTROPIC LAYER IN HARMONIOUS INFLUENCE MODE

V.F. YANUSHKEVICH, E.Yu. ZAYATS, K.I. KREMENYA

### Abstract

The entrance impulse analysis of an plazma-like type anisotropic layer in the harmonious influence mode is carried out. Consistent patterns of dielectric layer resistance change in the wide frequency and deep range are determined.

### Список литературы

1. *Moskvichew V.N.* // 9-th Microw. Conf. NICON 91. Rydzyna, May, 20–22, 1991. P. 240–244.
2. *Баскаков С.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1992.
3. *Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золоторев В.П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М., 1986.
4. *Москвичев В.Н.* // Радиотехника и электроника. 1989. Вып. 18. С. 91–96.
5. *Гололобов Д.В.* Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. М., 2009.