

УДК 550.837.75:553.98

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ
СО СРЕДОЙ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ****С.В. СТЕПУЛЕНКО, канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)**

Приведена математическая модель для исследования взаимодействия амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородной залежью. Представлена структура, даны физико-химические свойства сред в окрестности углеводородов. Выбрано и обосновано применение квазигидродинамического метода анализа параметров сред. Решается уравнение движение электрона, на основании которого выводится тензор диэлектрической проницаемости среды над углеводородными залежами. Для расчетов используются экспериментально полученные данные параметров среды над залежами углеводородов. Исследуются комбинационные составляющие тензора диэлектрической проницаемости. Проанализированы частотные зависимости компонентов тензора. Установлены наиболее значимые соотношения частот и амплитуд воздействующих сигналов для оптимального поиска и оконтуривания углеводородных залежей.

Введение. В последнее время наметилась тенденция активного применения электромагнитных методов (ЭММ) в поисковой геофизике. Важнейшей особенностью данных методов является высокая чувствительность и возможность их использования в сложной геологической обстановке. Эффективное их применение объясняется достаточной достоверностью, экологической чистотой по сравнению с методами грави-, сейсмо- и магниторазведки.

Требования, предъявляемые к информативности и достоверности методов поиска и выделения месторождений и скоплений углеводородных залежей (УВЗ), предполагают дальнейшее развитие ЭММ с целью повышения производительности геологоразведочных работ, повышения точности определения границ залежей полезных ископаемых. В последнее время проводятся активные исследовательские работы ЭММ, по результатам которых создаётся аппаратура, используемая на практике.

Электромагнитные методы имеют существенные преимущества перед методами на постоянном токе, заключающиеся в изучении не только контраста сопротивления пород, но и характеристик взаимодействующего с объектом электромагнитного поля (ЭМП) – амплитуд различных составляющих, их фазовых компонент, поляризации и т.д. Таким образом, появляется возможность получать значительно больше информации от исследуемых объектов, варьируя параметрами электромагнитных волн (ЭМВ) в различных диапазонах частот. При этом можно создать малогабаритную, маловесную, мобильную аппаратуру, позволяющую существенно повысить производительность геологических работ и удобства её эксплуатации.

Анализ существующих методов показывает, что при представлении среды над УВЗ в виде анизотропной неоднородности плазмоподобного типа использование для поиска и выделения двухчастотных и модулированных сигналов ведёт к повышению точности и достоверности георазведки углеводородов [1, 2].

Цель работы заключается в обосновании выбора характеристик ЭМВ при амплитудно-частотно-модулированном (АЧМ) взаимодействии, разработке методов и аппаратурных средств для качественного повышения уровня достоверности поиска и выделения залежей углеводородов.

Результаты теоретических исследований и существующие модели УВЗ показывают, что свойства среды над залежью нефти и газа отличаются от данных, полученных при исследовании образцов пород, отобранных непосредственно над УВЗ. При этом аномалии ЭМП на реальном месторождении могут достигать нескольких десятков процентов. Данные расхождения объясняются непосредственным влиянием углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ. Поэтому исследование отобранных образцов вмещающих пород над УВЗ в отрыве от естественных условий залегания не соответствует реальной физической картине, возникающей над реальным месторождением или скоплением нефти и газа.

Представим реальную залежь углеводородов (рис. 1) в виде среды 4, погруженной в среду с потерями (среда 2), имеющей границу раздела OX с воздушным пространством (среда 1) [1]. Залежь находится на глубине ΔZ от границы сред 1 – 2 и имеет мощность Z_1 и протяжённость X_1 .

Окружающее углеводороды пространство (среда 2) находится в физическом и химическом равновесии со средой 1 и содержит твердый кристаллический скелет, пронизанный электролитом и проводящими включениями за счет минералов с электронной проводимостью. Под действием высоких температур и пластового давления над залежью углеводородов происходят электрохимические процессы, приводящие к образованию на границе с воздушным пространством промежуточной области (среда 3), характеризующейся избытком свободных электронов.

Исследования образцов пород над УВЗ свидетельствуют о хлоридно-натриевой среде в рассолах повышенной концентрации щелочных и щелочных металлов, а также изотопных элементов. Такие усло-

вия способствуют образованию в зоне над УВЗ сложных ионных соединений полупроводникового характера, обладающих повышенной термоэлектронной эмиссией (до 10,0 мкА/м² при температуре 20 °С).

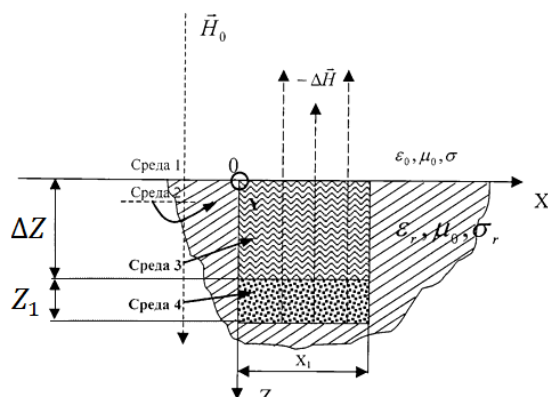


Рис. 1. Модель разреза геологического профиля над УВЗ

Отличие физических свойств пород в области залежи от свойств пород-коллекторов, в которых она находится, выражается в уменьшении плотности залежи по сравнению с законтурной областью, повышении суммарного электрического сопротивления, понижении скорости сейсмических продольных волн, увеличении их поглощения (ослабления) и т.д.

Анализ физико-химической обстановки над УВЗ [1] показывает, что над залежью существует поток электронов, приводящий к появлению геомагнитной аномалии ΔH из-за проявления диамагнитных свойств перемечающихся частиц в среде. Данное явление можно объяснить действием слабой лоренцевой силы, при которой появляется коррекция территории движения электрона в постоянном магнитном поле.

Теоретический анализ. Для рассмотренной электрохимической обстановки в окрестности залегающих углеводородов следует отдать предпочтение квазигидродинамическому приближению с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений, ввиду отсутствия необходимости учёта точных пространственно-временных перемещений частиц.

В рамках такого приближения уравнение движения электрона имеет вид:

$$m \frac{d\dot{\mathfrak{G}}}{dt} + v m \dot{\mathfrak{G}} = q \dot{E} + q \mu_0 [\dot{\mathfrak{G}}, \dot{H}_0], \quad (1)$$

где m , q , $\dot{\mathfrak{G}}$ – масса, заряд и скорость движения частиц, v – частота столкновений электрона с тяжёлыми частицами; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; E_0 – напряженность электрического поля ЭМВ.

Решение вопроса о воздействии гармонической ЭМВ на анизотропную среду (АС) с использованием (1) приведено в [1].

Исследование процесса взаимодействия АЧМ-сигналов на АС представляет теоретический и практический интерес, связанный с поиском новых решений при реализации новых и модернизации действующих ЭММ. При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал имеет вид:

$$e t = E_\omega (1 + k_m \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t + \beta \cdot \cos \Omega t, \quad (2)$$

где E_ω – амплитуда сигнала несущей частоты ω ; k_m , β – соответственно коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции; Ω – частота модуляции.

При воздействии сигнала со смешанной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) составляющие скорости частиц будут определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \mathfrak{G}_x = \frac{e}{m} \cdot E_x (1 + K_E \cos \alpha t) \cdot \frac{j\tilde{\omega}_1 + v}{(j\tilde{\omega}_1 + v)^2 + \omega_r^2} - \frac{e}{m} \cdot \frac{\omega_r \cdot E_y (1 + K_e \cos \alpha t)}{(j\tilde{\omega}_1 + v)^2 + \omega_r^2}, \\ \mathfrak{G}_y = \omega_r \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{E_x (1 + K_E \cos \alpha t)}{(j\tilde{\omega}_1 + v)^2 + \omega_r^2} + \frac{e}{m} \cdot \frac{E_y (1 + K_e \cos \alpha t) \cdot (j\tilde{\omega}_1 + v)}{(j\tilde{\omega}_1 + v)^2 + \omega_r^2}, \\ \mathfrak{G}_z = \frac{e}{m} \cdot \frac{E_z (1 + K_E \cos \alpha t)}{j\tilde{\omega}_1 + v}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\tilde{\omega}_1 = \omega [1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]; \quad (4)$$

ω_r – гиротропная частота.

Плотности токов определяются выражениями:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_x &= \varepsilon_0 \omega_n^2 E_x \frac{(1 + \beta \cdot \cos \Omega t) j \tilde{\omega}_4 + v}{j \tilde{\omega}_4 + v^2 + \omega_r^2} - \frac{\varepsilon_0 \omega_n^2 \omega_z E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j \tilde{\omega}_4 + v^2 + \omega_r^2}; \\ \delta_y &= \frac{\varepsilon_0 \omega_n^2 \omega_z E_x \cdot (1 + \beta \cos \Omega t)}{j \tilde{\omega}_4 + v^2 + \omega_r^2} + \frac{\omega_n^2 \varepsilon_0 E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) j \tilde{\omega}_4 + v}{j \tilde{\omega}_4 + v^2 + \omega_r^2}; \\ \delta_z &= \frac{\omega_n^2 \varepsilon_0 E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j \tilde{\omega}_4 + v}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где ω_n – плазменная частота.

А компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды для двух частичного потока:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \cdot \tilde{\omega}_4}{\omega} \cdot \frac{\omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4 \tilde{\omega}_4^2 \cdot v_i^2} + \right. \\ &+ j \left[\frac{\varepsilon_r \beta k_m \cdot \sin \Omega t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega t} - \frac{\varepsilon_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 v_i}{\omega} \cdot \frac{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2 + \omega_{Pi}^2}{(v_i^2 + \omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4 \tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] \left. \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \cdot \omega_{Pi}}{\omega} \cdot \frac{\omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4 \tilde{\omega}_4^2 \cdot v_i^2} - \frac{2 j \tilde{\omega}_4 v_i \omega_{Pi} \omega_{Pi}}{\omega [(v_i^2 + \omega_{Pi}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4 \tilde{\omega}_4^2 \cdot v_i^2]} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{Pi}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \cdot \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r \beta k_m \cdot \sin \Omega t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega t} - \frac{\varepsilon_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{Pi}^2 v_i}{\omega} \cdot \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Из (6) видно, что компоненты тензора включают в себя параметры смешанного модулированного сигнала: k_m , β , Ω и имеют более сложную зависимость, по сравнению с АМ- и ЧМ-сигналами.

Для анизотропных сред характерна зависимость свойств среды от поляризации и направления распространения радиоволн. Анизотропный диэлектрик описывается при этом тензором диэлектрической проницаемости вида:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} & \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{13} \\ \dot{\varepsilon}_{21} & \dot{\varepsilon}_{22} & \dot{\varepsilon}_{23} \\ \dot{\varepsilon}_{31} & \dot{\varepsilon}_{32} & \dot{\varepsilon}_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

При этом составляющие $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{31} = \varepsilon_{32} = 0$, и в общем случае тензор диэлектрической проницаемости описывается тремя компонентами:

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \dot{\varepsilon}_{22} = \dot{\varepsilon}_1; \quad \dot{\varepsilon}_{12} = \dot{\varepsilon}_{21} = \dot{\varepsilon}_2; \quad \dot{\varepsilon}_{33} = \dot{\varepsilon}_3.$$

Таким образом, тензор диэлектрической проницаемости из девяти элементов сводится к матрице, характеризуемой только тремя составляющими. Каждая из компонент тензора содержит сведения о собственно диэлектрической проницаемости и проводимости:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \varepsilon'_1 - j \varepsilon''_1, \\ \dot{\varepsilon}_2 &= \varepsilon'_2 - j \varepsilon''_2, \\ \dot{\varepsilon}_3 &= \varepsilon'_3 - j \varepsilon''_3, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_3$ – диэлектрические проницаемости и $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R \approx \text{Re} \dot{\varepsilon}_L, \text{Im} \dot{\varepsilon}_R \approx \text{Im} \dot{\varepsilon}_L$ – диэлектрические потери для каждой из составляющих.

Каждая из компонент имеет достаточно сложный вид и определяется в целом параметрами электронно-ионного потока.

Расчет компонент тензоров диэлектрической проницаемости производится на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [1]:

- глубина залегания УВЗ $h = 2,0 \dots 3,5$ км;

- разность потенциалов между залежью и земной поверхностью $\Delta\varphi = (0,2 \dots 0,4)$ В при средней температуре в области залежи $T = 350$ К;
- относительное изменение удельного электрического сопротивления вмещающих пород в пределах контура залежи $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 2 \dots 3$ при усредненных значениях диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\epsilon_r = 5 \dots 10$ и электрической проводимости $\sigma_r = 0,003 \dots 0,03$ См/м;
- отрицательная геомагнитная аномалия $\Delta H = (8,0 \dots 15,0) \cdot 10^{-3}$ А/м при значениях напряженности магнитного поля земли $H_0 = 39,0$ А/м;
- коэффициент ионизации $\kappa_i = 1$;
- концентрация частиц $N_e = N_H = (0,3 \dots 12,0) 10^{16}$ м³;
- дрейфовая подвижность заряженных частиц $\mu = \mu_e = \mu_i = (0,5 \dots 2,5)$ м²/В;
- эффективные частоты столкновений:

$$\text{электронно-ионные } v_{\text{эф.}} = (0,3 \dots 1,5) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$$

$$\text{ионные } v_{\text{эф.}} = (0,12 \dots 0,7) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}.$$

Анализ тензоров проведем по методике, приведенной в работе [1], заключающейся в исследовании частотных характеристик комбинационных составляющих:

$$\dot{\epsilon}_R \omega = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\epsilon_R + j\text{Im}\epsilon_R, \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_L \omega = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\epsilon_L + j\text{Im}\epsilon_L.$$

Численные исследования показали, что $\text{Re}\dot{\epsilon}_R \approx \text{Re}\dot{\epsilon}_L u \arg\dot{\epsilon}_R \approx \arg\dot{\epsilon}_L$.

Как видно из рисунка 2, при частоте несущего колебания $f = (10^5 \dots 10^6)$ Гц величина $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$ не изменяется и примерно равна нулю, причём влияние частоты модуляции АМ на диэлектрическую проницаемость на этом отрезке частот практически отсутствует.

В диапазоне частот $f = (10^6 \dots 10^9)$ Гц изменение коэффициента k_m и частоты модуляции F приводит к существенному изменению величины $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$. Увеличение частоты модуляции и коэффициента АМ приводит к уменьшению $|\text{Re}\dot{\epsilon}_R|$ и изменению частот центральной $f_{2ц}$ и промежуточной $f_{2п}$. Так, при $F = 1$ МГц коэффициенте модуляции $k_m = 0,5$ происходит уменьшение $f_{2ц}$ и увеличение $f_{2п}$, а при $F = 10$ МГц, коэффициенте модуляции $k_m = 1$ – увеличение $f_{2ц}$ и $f_{2п}$ по сравнению со значениями частот для $F = 0,1$ МГц и $k_m = 0,1$. Индекс ЧМ β не влияет на $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$ и $\text{Re}\dot{\epsilon}_L$.

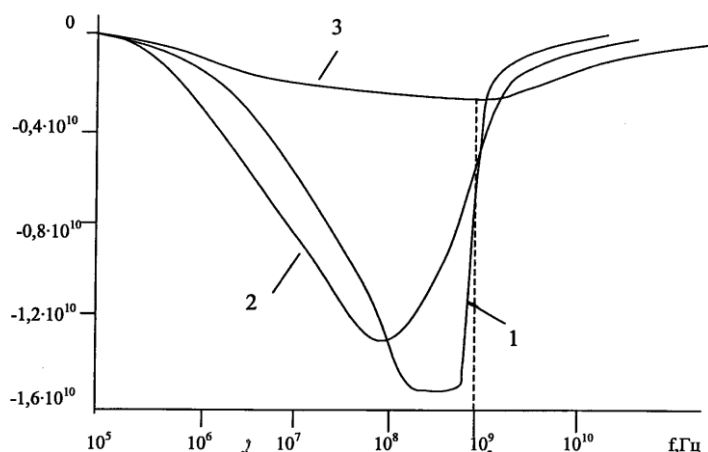


Рис. 2. Зависимости $\text{Re}\dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$:

1 – для $F = 0,1$ МГц, $k_m = 0,1$; 2 – для $F = 1$ МГц, $k_m = 0,5$; 3 – для $F = 10$ МГц, $k_m = 1$

Как видно из рисунка 3, значение $\arg\dot{\epsilon}_R$ изменяется от -185 до -130° на отрезке частот $10^5 \dots 10^7$ Гц, а дальше происходит резкое увеличение фазы до нуля (при $f \approx 2,5 \dots 10^7$ Гц) и до 180° (при $f \approx 10^8$ Гц) при $F = 0,1$ МГц, $\beta = 10$ и $k_m = 0,1$.

При дальнейшем увеличении частоты несущего колебания фаза остаётся неизменной. Для $F = 10$ МГц, $\beta = 10$ и $k_m = 1$ характер изменения $\arg \dot{\epsilon}_R$ остаётся прежним, за исключением численных значений. При увеличении индекса ЧМ до значения $\beta = 100$ при неизменных F и k_m происходит уменьшение фазы от -80° до -170° на отрезке $10^5 \dots 10^7$ Гц. Дальнейшее увеличение частоты практически не оказывает влияния на величину $\arg \dot{\epsilon}_R$. При $\beta = 100$ и частоте модуляции $F = 0,1 \dots 1$ МГц $\arg \dot{\epsilon}_R \approx 180^\circ$ во всём диапазоне частот.

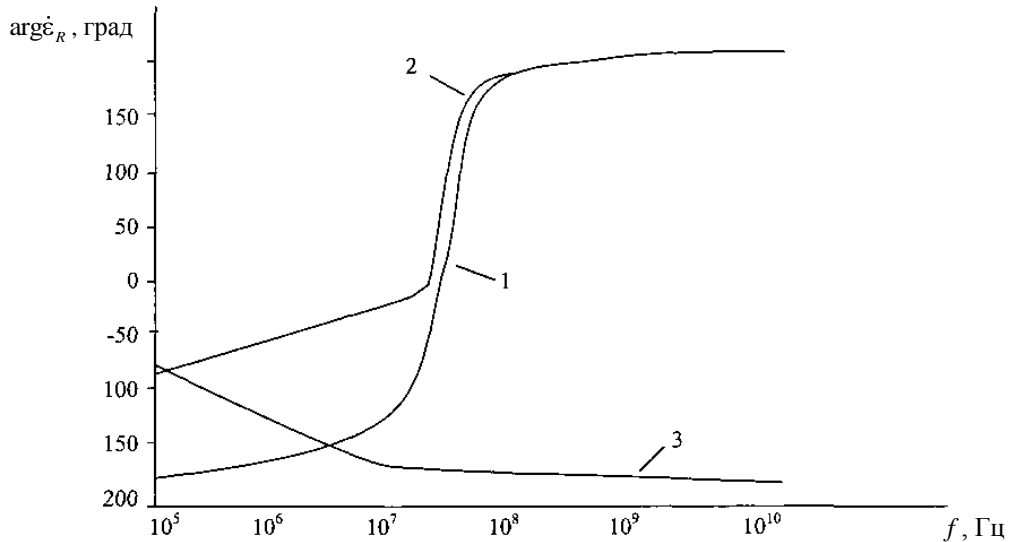


Рис. 3. Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$:

1 – для $F = 0,1$ МГц, $\beta = 10$, $k_m = 0,1$; 2 – для $F = 1$ МГц, $\beta = 10$, $k_m = 1$; 3 – для $F = 10$ МГц, $\beta = 10$, $k_m = 1$

Анализ зависимостей $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(k_m)$ показывает, что при $k_m = 0 \dots 0,4$ (рис. 4) величина $\arg \dot{\epsilon}_R$ остаётся постоянной.

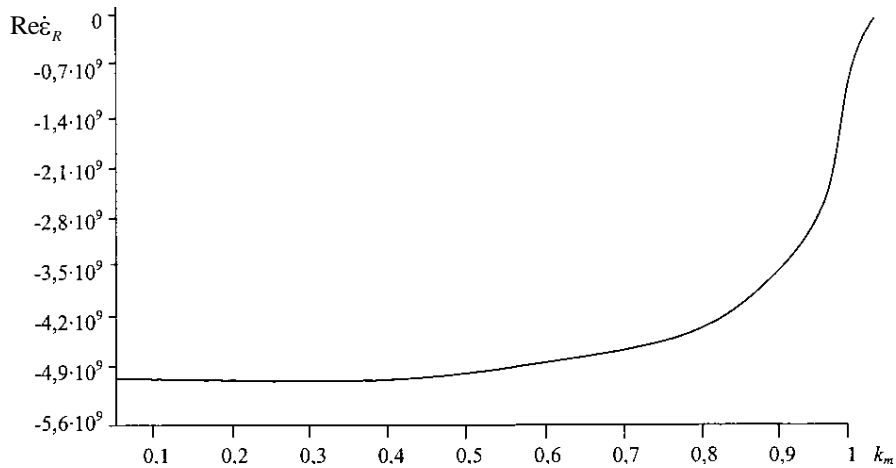
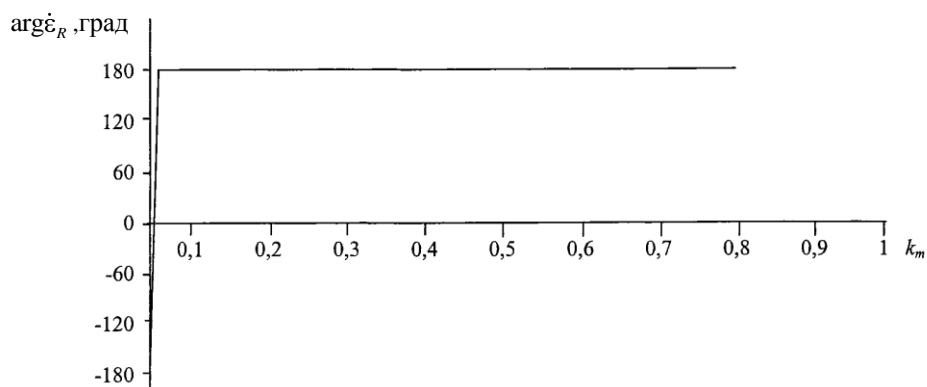
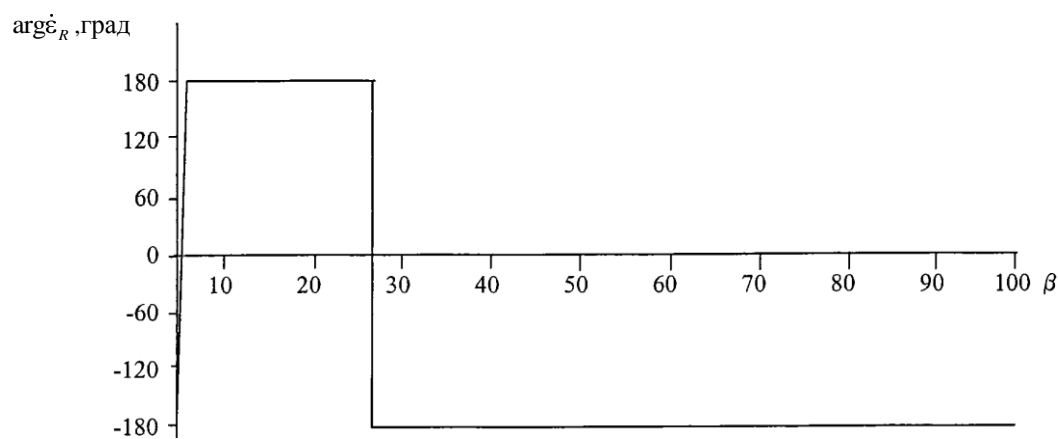


Рис. 4. Зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_R = \varphi(k_m)$

Дальнейшее увеличение k_m приводит к росту тензора диэлектрической проницаемости. Особенно заметное влияние этого коэффициента наблюдается при значениях $k_m = 0,9 \dots 1,0$. На фазу (рис. 5) оказывают влияние очень маленькие значения коэффициента амплитудной модуляции ($k_m \approx 0 \dots 0,01$).

Как видно из рисунка 6, влияние индекса частотной модуляции на фазу наиболее существенно при $\beta = 0 \dots 3$, когда фаза $\arg \dot{\epsilon}_R$ резко изменяется от -180° до 180° , и при $\beta \approx 25 \dots 28$, когда фаза изменяется от 180° до -180° . При $\beta = 3 \dots 25$ значение $\arg \dot{\epsilon}_R = 180^\circ$, а при $\beta = 25 \dots 100$ $\arg \dot{\epsilon}_R = -180^\circ$.

Рис. 5. Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(k_m)$ Рис. 6. Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(\beta)$

Заключение. Теоретические исследования взаимодействия сложных ЭМВ с анизотропной средой над УВЗ способствуют оптимизации амплитудно-временных параметров электродинамических сигналов, используемых для поиска и оконтуривания границ УВЗ. Анализ воздействия на среду с анизотропными свойствами АЧМ-сигналов с различным соотношением амплитуд и частот показал возможность искусственного изменения резонансов взаимодействия преимущественно за счет разности частот, участвующих в формировании сложного колебания.

Применение колебаний сложной формы при использовании многорезонансной модели взаимодействия и среды над УВЗ позволяет проводить не только поиск границ залежей, но и осуществлять качественную оценку электродинамических параметров сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвичев, В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичев // Радиотехника и электроника. – 1988. – Вып. 18. – С. 91 – 96.
2. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. наук. – 2002. – № 1. – С. 49 – 54.

Поступила 21.09.2009