

УДК 539.216:546.824-31

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА УГЛЕВОДОРОДНУЮ ЗАЛЕЖЬ

Е.Ю. ЗАЯЦ, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.В. КАЛИНЦЕВ

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

*Поступила в редакцию 23 декабря 2014*

Приведены результаты исследования взаимодействия модулированных сигналов с различными параметрами с углеводородными залежами.

*Ключевые слова:* модулированный сигнал, углеводородная залежь, диэлектрическая проницаемость.

### Введение

Проводится анализ частотных характеристик компонентов тензоров диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов в различных режимах взаимодействия электромагнитных волн для уточнения параметров сигналов при поиске и выделении залежей углеводородов. С данной целью использован широкий диапазон соотношений частот, амплитуд и параметров сигналов. На основе проведенного анализа даются рекомендации по использованию определенных соотношений параметров, обеспечивающих максимально точное выделение углеводородных залежей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке радиотехнических для обнаружения углеводородных залежей, а также определении наиболее оптимальных методов их поиска.

### Методика эксперимента

В статье описаны исследования залежей углеводородов в процессе многочастотного воздействия на нее электромагнитных волн с различными типами модуляции.

При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал

$$e(t) = E_{\omega} (1 + k_m \cos \Omega t) \cos[\omega t + \beta \cdot \cos \Omega t], \quad (1)$$

где  $E_{\omega}$  – амплитуда сигнала несущей частоты  $\omega$ ;  $k_m$  – соответственно коэффициент амплитудной модуляции;  $\beta$  – индекс частотной модуляции.

При воздействии сигнала со смешанной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) [1, 2] составляющие скорости частиц будут определяться системой:

$$\begin{cases} \vartheta_x = \frac{e}{m} E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) \frac{j\tilde{\omega}_4 + \nu}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2} - \frac{e}{m} \omega_{\Gamma} E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) \frac{1}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ \vartheta_y = \omega_{\Gamma} \frac{e}{m} \frac{E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2} + \frac{e}{m} \frac{E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) (j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ \vartheta_z = \frac{e}{m} \frac{E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}, \end{cases}$$

где  $\tilde{\omega}_4 = \omega [1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]$

Плотности токов определяются выражениями:

$$\begin{cases} \delta_x = \varepsilon_0 \omega_{\Pi}^2 E_x \frac{(1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2} - \frac{\varepsilon_0 \omega_{\Pi}^2 \omega_{\Gamma} E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ \delta_y = \frac{\varepsilon_0 \omega_{\Pi}^2 \omega_{\Gamma} E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2} + \frac{\omega_{\Pi}^2 \varepsilon_0 E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_{\Gamma}^2}, \\ \delta_z = \frac{\varepsilon_0 \omega_{\Pi}^2 E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}. \end{cases}$$

Компоненты тензора [3] включают в себя параметры смешанного модулированного сигнала:  $K_m$ ,  $\beta$ ,  $\Omega$ ,  $K_{\omega}$  и имеют более сложную зависимость, по сравнению с амплитудно-модулированными (АМ) и частотно-модулированными (ЧМ) сигналами [1, 4, 5].

### Взаимодействие АМ-сигналов с АС

Ввиду того, что вещественные части компонентов тензора не зависят от параметров АМ-сигналов, отсутствует необходимость их анализа. При этом фазовые компоненты  $\varepsilon_R$  и  $\varepsilon_L$  зависят от параметров АМ-сигнала [5, 6]. Частотные зависимости величины изменения фазового компонента тензора диэлектрической проницаемости среды ( $\arg \varepsilon_R$ ) представлены на рис. 1 (кривая 1 соответствует значениям коэффициента  $k_m=0,1$  и частоты  $F=10$  МГц, кривая 2 – значениям коэффициента  $k_m=0,5$  и частоты  $F=1$  ГГц, кривая 3 – значениям коэффициента  $k_m=1$  и частоты модуляции  $F=1$  ГГц).

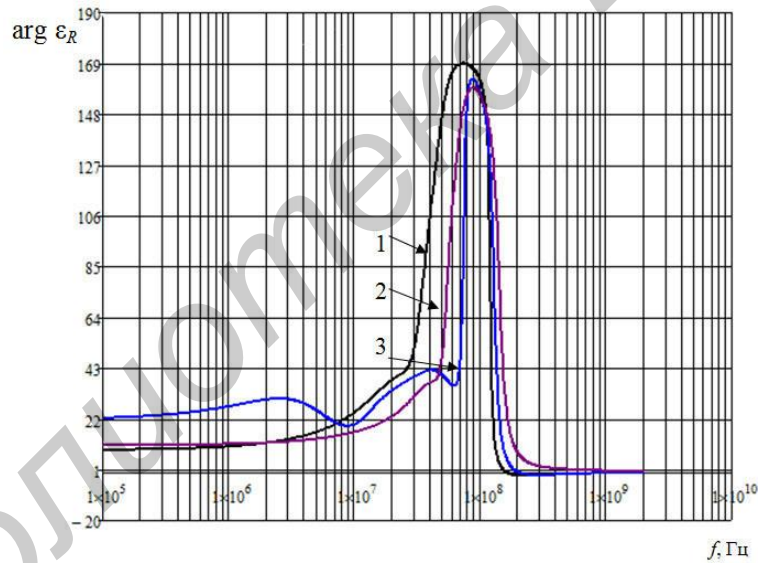


Рис. 1. Зависимости  $\arg \varepsilon_R = \varphi(f)$  1 –  $k_m=0,1$  и  $F=10$  МГц; 2 –  $k_m=0,5$  и  $F=1$  ГГц; 3 –  $k_m=1$  и  $F=1$  ГГц

В диапазоне частот от  $10^5$  до  $2 \cdot 10^7$  Гц значение  $\arg \varepsilon_R$  изменяется незначительно. На отрезке  $2 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$  Гц происходит увеличение фазы компонентов тензора. Максимальное изменение величины  $\arg \varepsilon_R$  наблюдается в диапазоне частот  $7 \cdot 10^7 \dots 1,5 \cdot 10^8$  Гц, где фаза скачком изменяется от значения ( $165^\circ \dots 170^\circ$ ) до ( $-1^\circ \dots 0^\circ$ ). Частота несущей, при которой фаза комбинированного элемента (КЭ) равняется нулю, лежит в пределах ( $100 \dots 400$ ) МГц. Установлено, что при изменении коэффициента АМ происходит изменение величины  $\arg \varepsilon_R$ . На отрезке частот  $10^5 \dots 10^7$  Гц влияние значения  $k_m$  на фазу КЭ практически отсутствует.

В диапазоне частот  $10^8 \dots 10^{10}$  Гц происходит существенное влияние коэффициента АМ на величину  $\arg \varepsilon_R$ . Так, при увеличении  $k_m$  наблюдается уменьшение частоты перехода фазы КЭ через нуль. Анализ частотных зависимостей величины  $\arg \varepsilon_L$  показал, что данные характеристики практически не отличаются от аналогичных зависимостей  $\arg \varepsilon_R = \varphi(f)$ . Характеристики  $\arg \varepsilon_L = \varphi(k_m)$  и  $\arg \varepsilon_R = \varphi(k_m)$  практически совпадают.

Таким образом, применение АМ-сигналов не ведет к изменению КЭ  $\text{Re } \epsilon_R$  и  $\text{Re } \epsilon_L$ , однако оказывается влияние частоты несущей и коэффициента амплитудной модуляции на величину аргумента КЭ [1,2,4].

### Взаимодействие ЧМ-сигналов с АС

Тензор диэлектрической проницаемости для данного режима взаимодействия приведен в (1). Частотные зависимости  $\text{Re } \epsilon_R$  и  $\text{Re } \epsilon_L$  при изменении индекса угловой модуляции приведены на рис. 2, 4. (кривая 1 соответствует индексу модуляции  $\beta = 0,5$ ; кривая 2 – индексу модуляции  $\beta = 1$ ; кривая 3 – индексу модуляции  $\beta = 5$ ). Приведенные зависимости показывают, что увеличение индекса модуляции приводит к несущественному увеличению частоты циклотронного электронного резонанса и резкому уменьшению частоты плазменного резонанса, представленного на рис. 3 (кривая 1 соответствует индексу модуляции  $\beta = 0,5$ ; кривая 2 – индексу модуляции  $\beta = 1$ ; индексу модуляции  $\beta = 5$ ). Это же характерно и для  $\epsilon_R$  (рис. 5). Характер фазочастотных характеристик  $\epsilon_R$  и  $\epsilon_L$  для различных  $\beta$  не изменяется (рис. 4, 5). При этом с ростом индекса модуляции частота, на которой  $\arg \epsilon_R = 0$ , соответствующая ВЧ-резонансу, уменьшается.

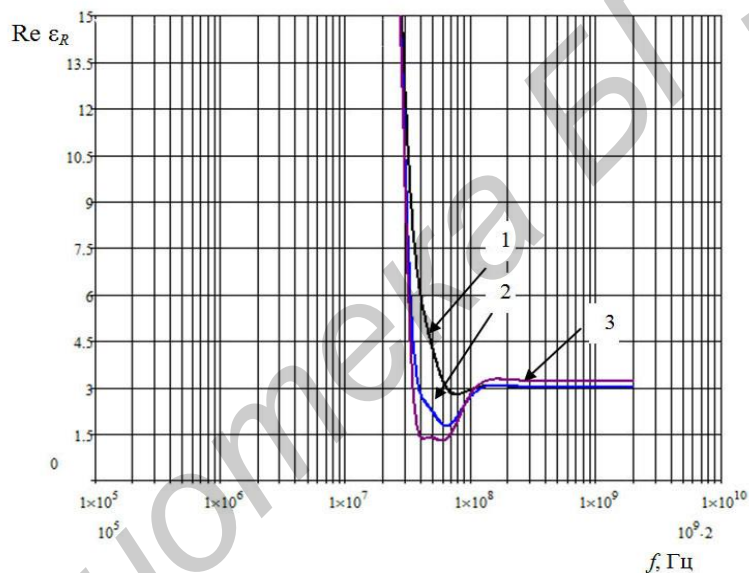


Рис. 2. Зависимости  $\text{Re } \epsilon_R = \varphi(f, \beta)$ : 1 –  $\beta = 0,5$ ; 2 –  $\beta = 1$ ; 3 –  $\beta = 5$

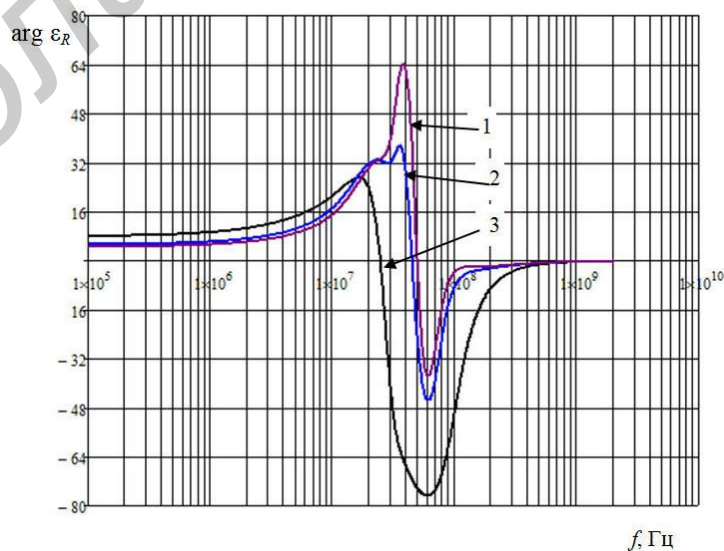


Рис. 3. Зависимости  $\arg \epsilon_R = \varphi(f, \beta)$ : 1 – для  $\beta = 0,5$ ; 2 – для  $\beta = 1$ ; 3 – для  $\beta = 5$

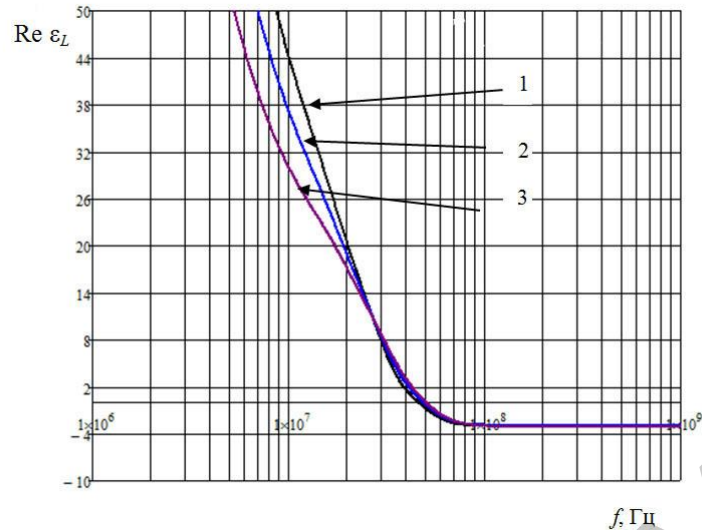


Рис. 4. Зависимости  $\text{Re } \varepsilon_L = \varphi(f_2)$ : 1 –  $\beta = 0,5$ ; 2 –  $\beta = 1$ ; 3 –  $\beta = 5$

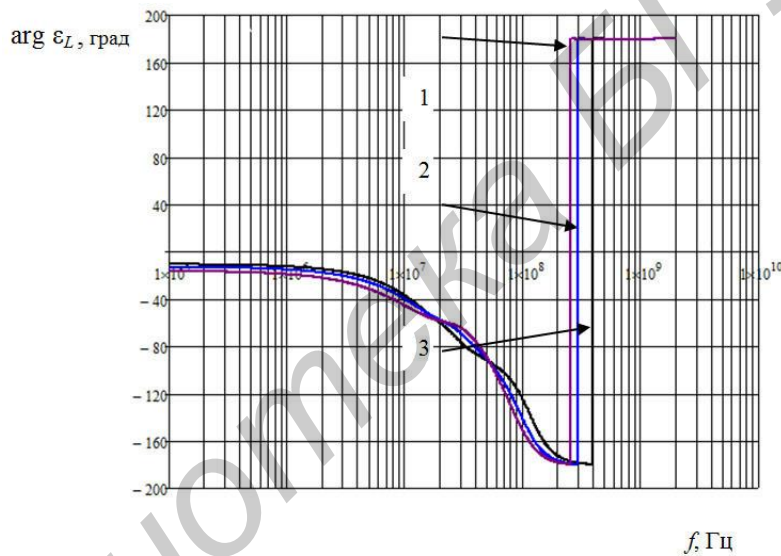


Рис. 5. Зависимости  $\text{arg } \varepsilon_L = \varphi(f_2)$ : 1 –  $\beta = 0,5$ ; 2 –  $\beta = 1$ ; 3 –  $\beta = 5$

Проведем анализ зависимостей КЭ тензора от индекса ЧМ  $\beta$  на частоте несущей  $f_2 = 500$  МГц, которая соответствует электронному плазменному резонансу. Величина  $\text{Re } \varepsilon_R$  уменьшается по линейному закону от значения 7,4 при  $\beta = 0$  до нуля при  $\beta \approx 27$ . Аналогичная зависимость наблюдается при  $\beta = 43^\circ \dots 100^\circ$ , где величина  $\text{Re } \varepsilon_R$  уменьшается от нуля до  $-18$ . При значениях индекса ЧМ  $\beta = 27 \dots 43$  происходит изменение знака  $\text{Re } \varepsilon_R$  и имеются три точки перехода этой величины через нуль: для  $\beta_1 \approx 25$ ,  $\beta_2 \approx 35$  и  $\beta_3 \approx 43$ . Фазочастотная характеристика  $\varepsilon_R$  уменьшается от  $-10^\circ$  при  $\beta = 0$  до  $-128^\circ$  для  $\beta = 30^\circ$ , затем происходит увеличение  $\text{arg } \varepsilon_R$  до  $-90^\circ$  при  $\beta = 40^\circ$ . Для значений индекса ЧМ  $\beta = 40^\circ \dots 60^\circ$  происходит резкое уменьшение фазы от  $-90^\circ$  до  $-205^\circ$  и с дальнейшим ростом  $\beta$  наблюдается незначительное изменение  $\text{arg } \varepsilon_R$ . Зависимости  $\text{Re } \varepsilon_L = \varphi(\beta)$  и  $\text{arg } \varepsilon_L = \varphi(\beta)$  имеют такой же вид, как и  $\text{Re } \varepsilon_R = \varphi(\beta)$  и  $\text{arg } \varepsilon_R = \varphi(\beta)$ . Таким образом, использование ЧМ на частоте несущей  $f_2 = 1$  ГГц с индексом  $\beta = 25 \dots 43$  может быть использовано для разработки методов поиска углеводородов. В таблице представлены расчетные значения частот, при которых  $\text{Re } \varepsilon_R = 0$  для случая ЧМ-сигналов.

Расчетные значения частот  $f_{2ц}$ ,  $f_{2п}$  для ЧМ-сигналов

$F_1$ , МГц	$\beta$	$F_{2ц}$ , Гц	$F_{2п}$ , Гц
20	0,1	3,59732E+6	1,56879E+8
	0,5	2,07592E+6	7,42368E+7
	1	5,93758E+6	5,79863E+7
	10	13,46837E+6	3,74962E+7
	100	4,75298E+6	9,57289E+6
100	0,1	3,24962E+6	2,95741E+8
	0,5	3,96347E+6	1,54981E+8
	1	1,02365E+7	1,37452E+8
	10	10,27823E+7	1,31287E+8
	100	3,04792E+6	1,18716E+8

### Результаты и их обсуждение

Из результатов исследования видно, что при индексах ЧМ  $\beta = 0,1 \dots 10$  частота резонансного взаимодействия  $f_{2ц}$  увеличивается, а при  $\beta = 100 \dots 1000$  происходит ее уменьшение. При увеличении  $\beta$  происходит уменьшение частоты  $f_{2п}$ , за исключением значения  $\beta = 10^2$  при частоте модуляции  $F_1 = 20$  МГц, где происходит увеличение частот плазменного резонанса.

### Заключение

В режиме воздействия АМ-сигнала на АС с учетом формул Дебая появляется дополнительная мнимая составляющая, зависящая от параметров АМ-сигнала. ЧМ-сигнал оказывает существенное влияние на физические процессы в среде над УВЗ. Проявляется это в модуляции проницаемости вещественной части диагональных компонентов тензора, а также являются сложной функцией от частотной составляющей, что позволяет вести разработку методов поиска и обнаружения УВЗ с дополнительной точностью.

## INFLUENCE OF MODULATED SIGNALS AT THE HYDROCARBON DEPOSIT

E.Y. ZAYATS, V.F. YANUSHKEVICH, S.V. KALINTSEV

### Abstract

The results of studies of the interaction modulated signals with different parameters with hydrocarbon deposits was carried out.

### Список литературы

1. Янушкевич В.Ф. // Приборы. Справочный журнал. 1999. № 10. С. 27–29.
2. Тархов А.Г. Поиски и разведка полезных ископаемых и геологическое картирование радиоволновым методом (радиокип). М., 1965.
3. Гололобов Д. В., Калинин С. В., Янушкевич В.Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук. 2010. № 4. С. 103–106.
4. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. // Приборы. Справочный журнал. 1999. № 10. С. 25–27.
5. Савченко В.Н., Смагин В.П. // Тез. докл. XXXII Всес. НТК. Владивосток. 1990. Т. 1 Ч.П. С. 80–82.
6. Гололобов Д.В., Москвичев В.Н., Стадник Ю.Н. // Геология нефти и газа. 1995. № 3. С. 26–30.