

# Управление параметрами излучения мультиферроиковой структуры электрическим полем

Аспирант кафедры ПТРА Никитин А.О.

# Цель исследования

Нахождение математического решения, способного связать волновые характеристики исследуемой магнитоэлектрической антенны с величиной прикладываемого электрического поля.

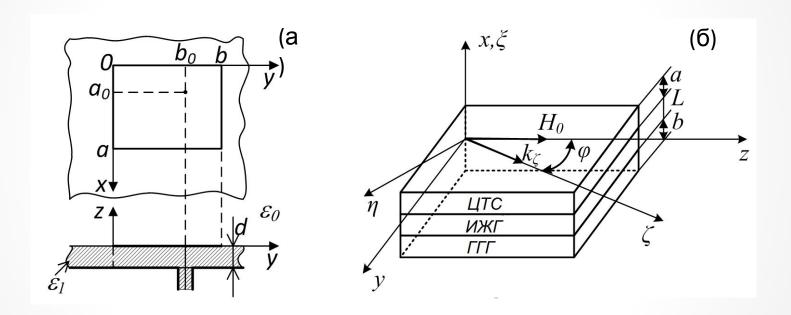
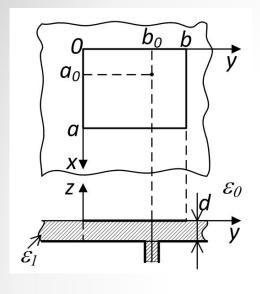


Рис.1. Структура исследуемой магнитоэлектрической антенны: а) конструкция; б) структура подложки

# Микрополосковая антенна



## Модифицированный резонаторный метод [4]:

Диаграмма направленности ( $kb \approx \pi$ ) в плоскости H(z0x):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \tag{1}$$

в плоскости E(z0y):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right]$$
 (2)

ГДЕ: 
$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right]$$

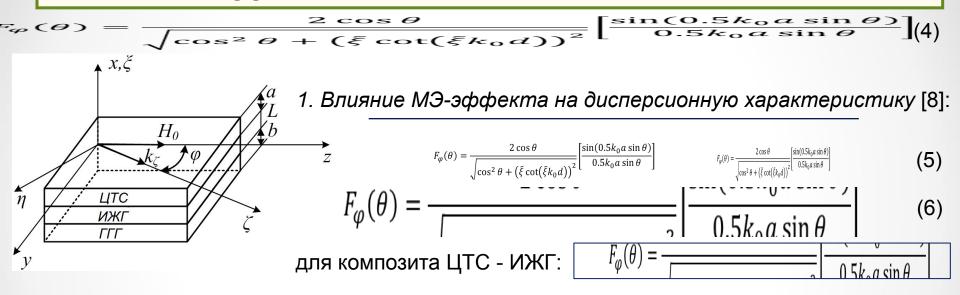
### Дисперсионное уравнение ЭМВ в подложке [5]:

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\left[\cos^{2}\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d)\right)^{2}\right]} \left[\frac{\sin(0.5k_{0}a\sin\theta)}{0.5k_{0}a\sin\theta}\right]$$

$$(3)$$

# Магнитоэлектрическая подложка

Приближенное дисперсионное уравнение для гибридной электромагнитноспиновой волны [7]:



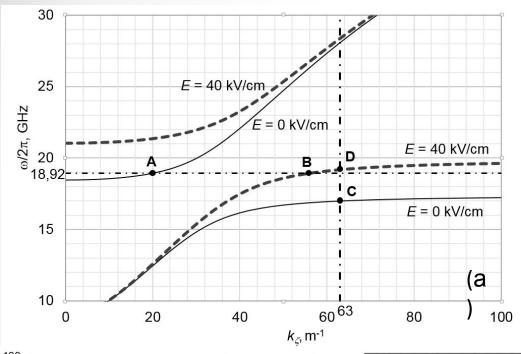
2. Влияние постоянного электрического поля на свойства сегнетоэлектрика (модель мультиполяризационного механизма [9])

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{1}{\left[\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}\right]} \left[\frac{\cos\theta}{\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}} \left[\frac{\sin(0.5k_{0}a\sin\theta)}{\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}}\right] F_{\varphi}(\theta) - \frac{2\cos\theta}{\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}} \left[\frac{\sin(0.5k_{0}a\cos\theta)}{\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}}\right] F_{\varphi}(\theta) - \frac{2\cos\theta}{\cos^{2}\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_{0}d))^{2}} \left[\frac{$$

для слоя ЦТС:

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\bar{\xi}\cot(\bar{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right]$$

# Дисперсионная характеристика гибридной волны



### Параметры для расчета:

слой a- ЦТС: a=100 мкм,  $\varepsilon_a(0)=1870$ ;

слой  $b - \Gamma\Gamma\Gamma$ : b = 500 мкм,  $\varepsilon_b = 11.6$ ;

слой L – ИЖГ: L = 5 мкм,  $\epsilon_{r} = 14$ ,

 $M_0 = 1750 \text{ }\Gamma\text{c}; H_{e0} = 4113 \text{ }\Theta.$ 

Угол  $\phi = 0^{\circ}$ .

Размеры МПА: 50 × 50 (мм),

d = a + L + b = 605 MKM.

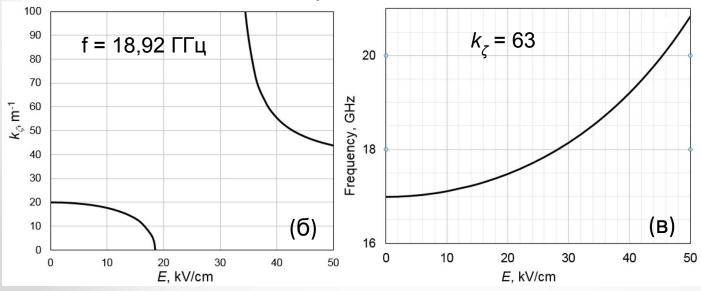


Рис.2. а) дисперсионная характеристика; зависимости от величины электрического поля (б) – постоянной распространения, (в) – резонансной частоты исследуемой антенны

# Диаграммы направленности исследуемой антенны

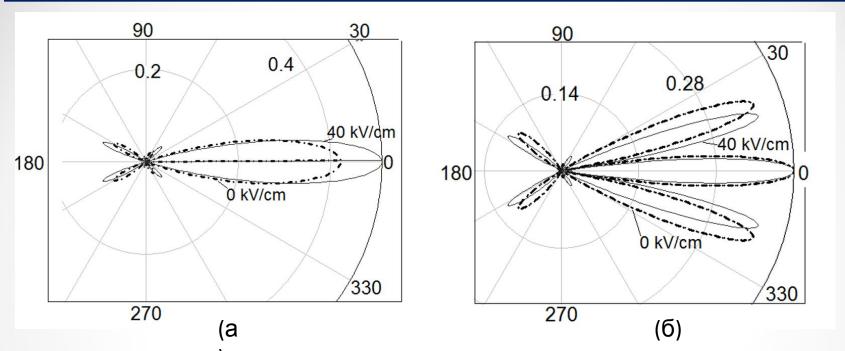


Рис.3. Расчетные диаграммы направленности, исследуемой МПА: (а) в плоскости H(z0x); (б) в плоскости E(z0y).

Увеличение прикладываемого постоянного электрического поля к сегнетоэлектрическому слою приводит к сужению диаграммы направленности в связи с уменьшением отношения резонансной длины волны к геометрическим размерам МПА.

# Выводы

- 1. В работе получено единое волновое решение, которое в полной мере способно учесть процессы, происходящие в исследуемой магнитоэлектрической композитной структуре при приложении к сегнетоэлектрической компоненте внешнего постоянного электрического поля.
- Увеличение постоянного электрического поля приводит линейному росту резонансной частоты структуры. Это происходит за счет двух механизмов: МЭ-эффекта – через изменение эффективного поля феррита, а также магнитного за счет зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического СЛОЯ прикладываемого постоянного электрического поля. эффект дает изменение резонансной частоты около изменении постоянного электрического поля на 40 кВ/см.
- 3. При постоянной частоте колебания изменение приложенного электрического поля может привести к образованию стоячих волн в слоистой структуре.

# Литература

- 1. М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филипов, Г. Сринивасан Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах / НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2005. 226 с
- 2. Р.В. Петров, Г.Сринивасан Проектирование магнитоэлектрической фазированной антенной решётки // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2009. № 50, С. 61-65.
- 3. M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko Magnetoelectric microwave devices // Ferroelectrics, 2011, 280(1):211-218 pp.
- 4. Б.А. Панченко, Е.И. Нефедев Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144 с.
- 5. Калиникос Б.А. Спиновый волны в ферромагнитных пленках // Соровский образовательный журнал, №5, 1996. С. 93-100.
- 6. Н.Ю. Григорьева, Б.А. Калиникос Теория спиновых волн в пленочных ферромагнитных многослойных структурах : Монография. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 176 с.
- 7. В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос Особенности спектра дипольно-обменных электромагнитноспиновых волн в несимметричных структурах металл-диэлектрик-ферромагнетик-диэлектрикметалл // ЖТФ, 2001, том71, вып.2: С. 89-93.
- 8. M. I. Bichurin, V. M. Petrov, and Yu. V. Kiliba Magnetic and magnetoelectric susceptibilities of a ferroelectric-ferromagnetic composite at microwave frequencies // PHYSICAL REVIEW B 66, 134404 (2002): 1-10pp.
- 9. Ang Ch., Yu Zh. DC electric-field dependence of the dielectric constant in polar dielectrics: Multipolarization mechanism model // Physical review B 69, 174109, 2004, 1-8 pp.

# Приложение

Приближенное дисперсионное уравнение для гибридной электромагнитно-спиновой волны

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 a))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{0.5k_0 a\sin\theta} \right] \qquad (1)$$

$$\mathsf{F}_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad \mathsf{F}_{\varphi}(\theta) = \frac{\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad \mathsf{F}_{\varphi}(\theta) = \frac{\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \right] \right] \right]$$

ГДе: 
$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{0.5k_0 a\sin\theta}\right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}\right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}\right] \qquad (\Pi.2)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cot(\xi k_0 d))^2}\right] \qquad (\Pi.3)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right]$$
(11.4)

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta\,(\text{II}.5)} \right]$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right]$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin(\theta)} \right]$$

# Приложение

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\xi \cot(\xi k_0 d)\right)^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{0.5k_0 a\sin\theta} \right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\xi \cot(\xi k_0 d)\right)^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{0.5k_0 a\sin\theta} \right] \qquad \left( \prod .8 \right)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\bar{\xi}\cot(\bar{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\bar{\xi}\cot(\bar{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right] \qquad \left( \prod.9 \right)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right]_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right] \quad \left( \prod.10 \right)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad (\Pi.11)$$

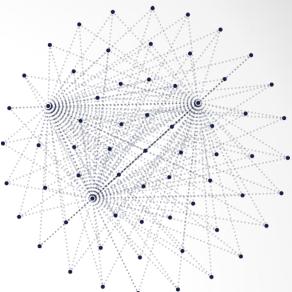
$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (\tilde{\xi}\cot(\tilde{\xi}k_0d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta} \right] \qquad (\Pi.12)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\frac{2}{5}\cot(\frac{2}{5}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \left(\frac{2}{5}\cot(\frac{2}{5}k_0d)\right)^2}} \left[\frac{\sin(0.5k_0a\sin\theta)}{0.5k_0a\sin\theta}\right] \qquad (\square.13)$$

$$\frac{1}{1 - \frac{2\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{\frac{2\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\sin\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\cos\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\cos\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\cos\theta)}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2} \right] = \frac{1}{1 - \frac{\cos\theta}{\cos^2\theta + (\xi\cos(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5k_0 a\cos\theta)}{\cos^2\theta +$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^{2}\theta + (\xi\cos(\xi k_{0}d))^{2}}} \left[ \frac{\sin(0.5k_{0}a\sin\theta)}{\cos(0.5k_{0}a\sin\theta)} \right] \qquad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^{2}\theta + (\xi\cos(\xi k_{0}d))^{2}}} \left[ \frac{\sin(0.5k_{0}a\sin\theta)}{\cos(0.5k_{0}a\sin\theta)} \right] \qquad (\Box.14)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2\cos\theta}{\sqrt{\cos^{2}\theta + (\xi\cos(\xi k_{0}d))^{2}}} \left[ \frac{\sin(0.5k_{0}a\sin\theta)}{\cos(0.5k_{0}a\sin\theta)} \right] \qquad (\Box.15)$$



# Спасибо за внимание!