



НОВГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО

---

# Управление параметрами излучения мультиферроиковой структуры электрическим полем

Аспирант кафедры ПТРА  
Никитин А.О.

2020

# Цель исследования

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

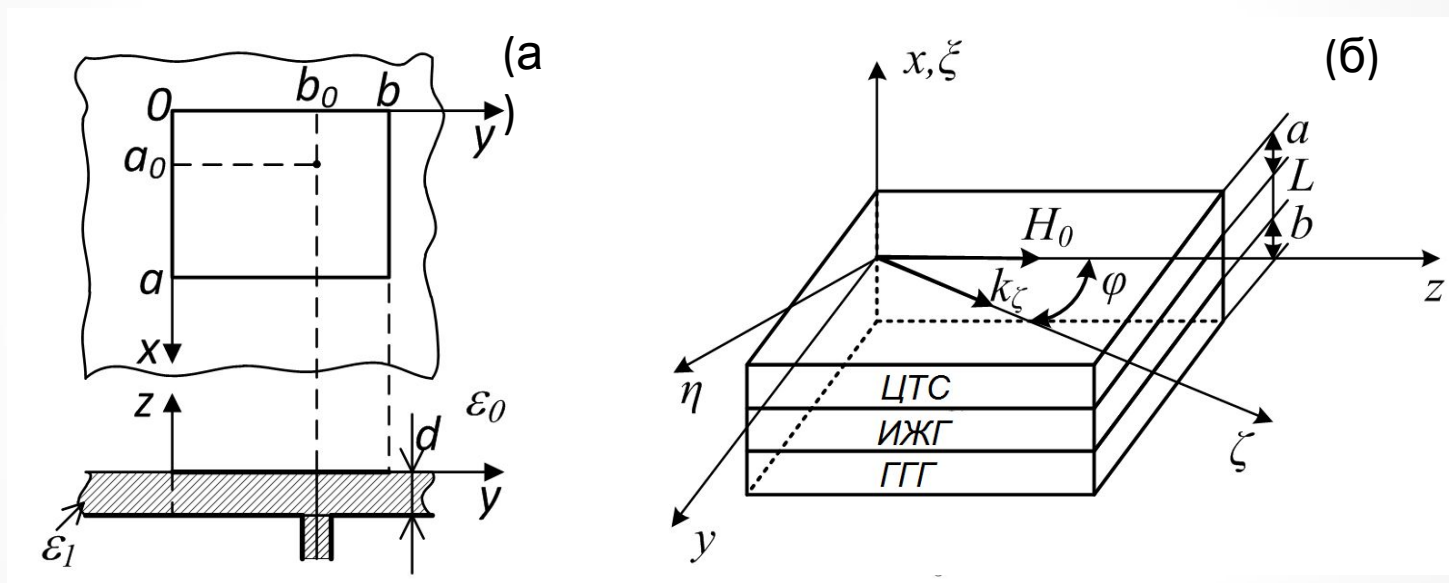


Рис.1. Структура исследуемой магнитоэлектрической антенны:  
а) конструкция; б) структура подложки

# Микрополосковая антенна

## Модифицированный резонаторный метод [4]:

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

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

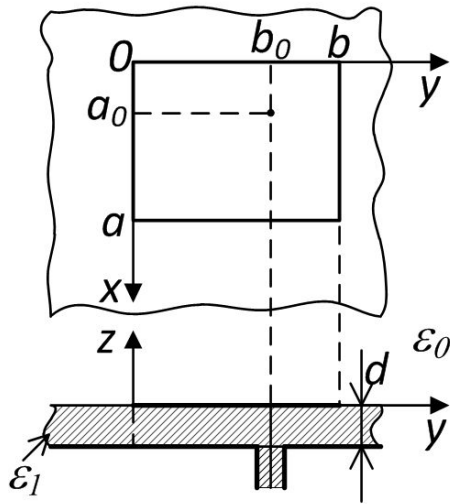
в плоскости  $E$  ( $zOy$ ):

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

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

## Дисперсионное уравнение ЭМВ в подложке [5]:

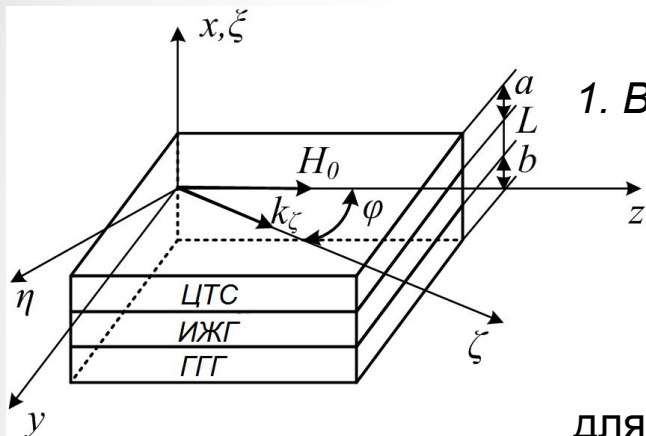
$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\tilde{\xi} \cot(\tilde{\xi} k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad \longrightarrow \quad F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\tilde{\xi} \cot(\tilde{\xi}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



# Магнитоэлектрическая подложка

Приближенное дисперсионное уравнение для гибридной электромагнитно-спиновой волны [7]:

$$F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (4)$$



1. Влияние МЭ-эффекта на дисперсионную характеристику [8]:

$$F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (5)$$

$$F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left| \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right| \quad (6)$$

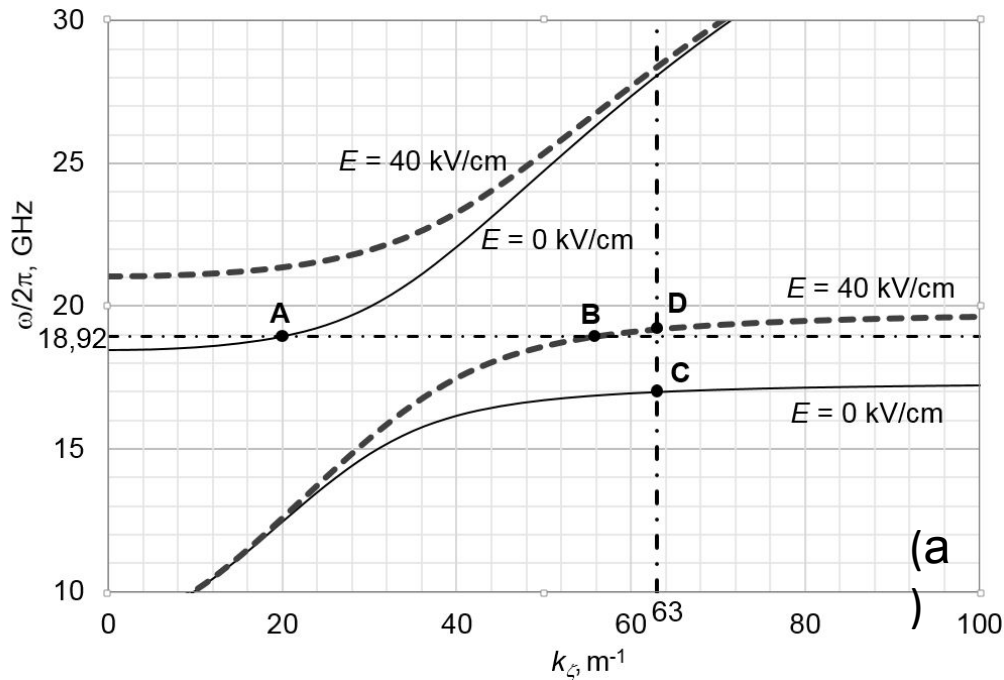
для композита ЦТС - ИЖГ:  $F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left| \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right|$

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

$$F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\tilde{\xi} \cot(\tilde{\xi} k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (7)$$

для слоя ЦТС:  $F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\tilde{\xi} \cot(\tilde{\xi} k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right]$

# Дисперсионная характеристика гибридной волны



## Параметры для расчета:

слой  $a$  – ЦТС:  $a = 100$  мкм,  $\epsilon_a(0) = 1870$ ;

слой  $b$  – ГГГ:  $b = 500$  мкм,  $\epsilon_b = 11.6$ ;

слой  $L$  – ИЖГ:  $L = 5$  мкм,  $\epsilon_L = 14$ ,

$M_0 = 1750$  Гс;  $H_{e0} = 4113$  Э.

Угол  $\phi = 0^\circ$ .

Размеры МПА:  $50 \times 50$  (мм),

$d = a + L + b = 605$  мкм.

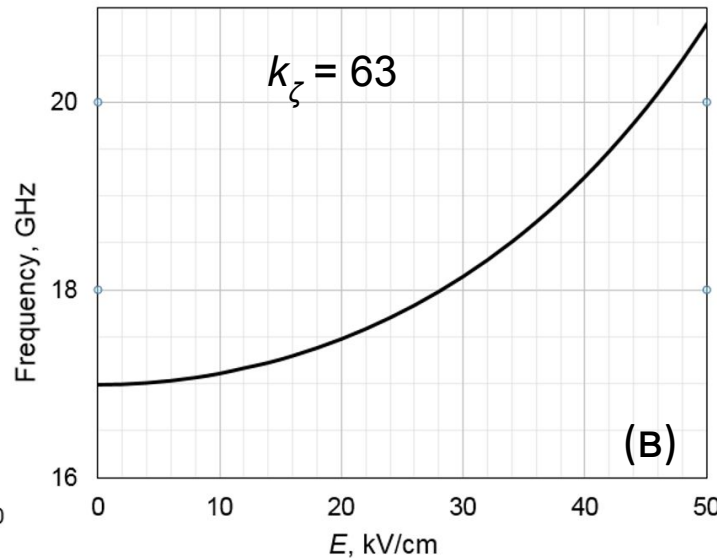
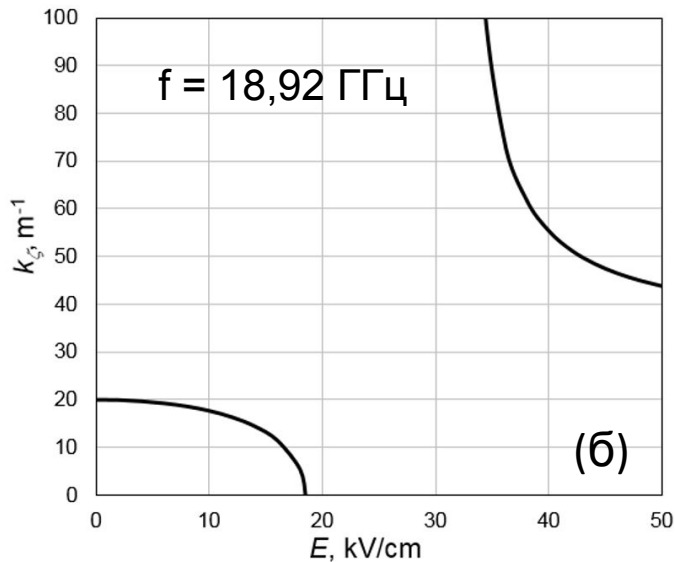


Рис.2. а) дисперсионная характеристика; зависимости от величины электрического поля (б) – постоянной распространения, (в) – резонансной частоты исследуемой антенны

# Диаграммы направленности исследуемой антенны

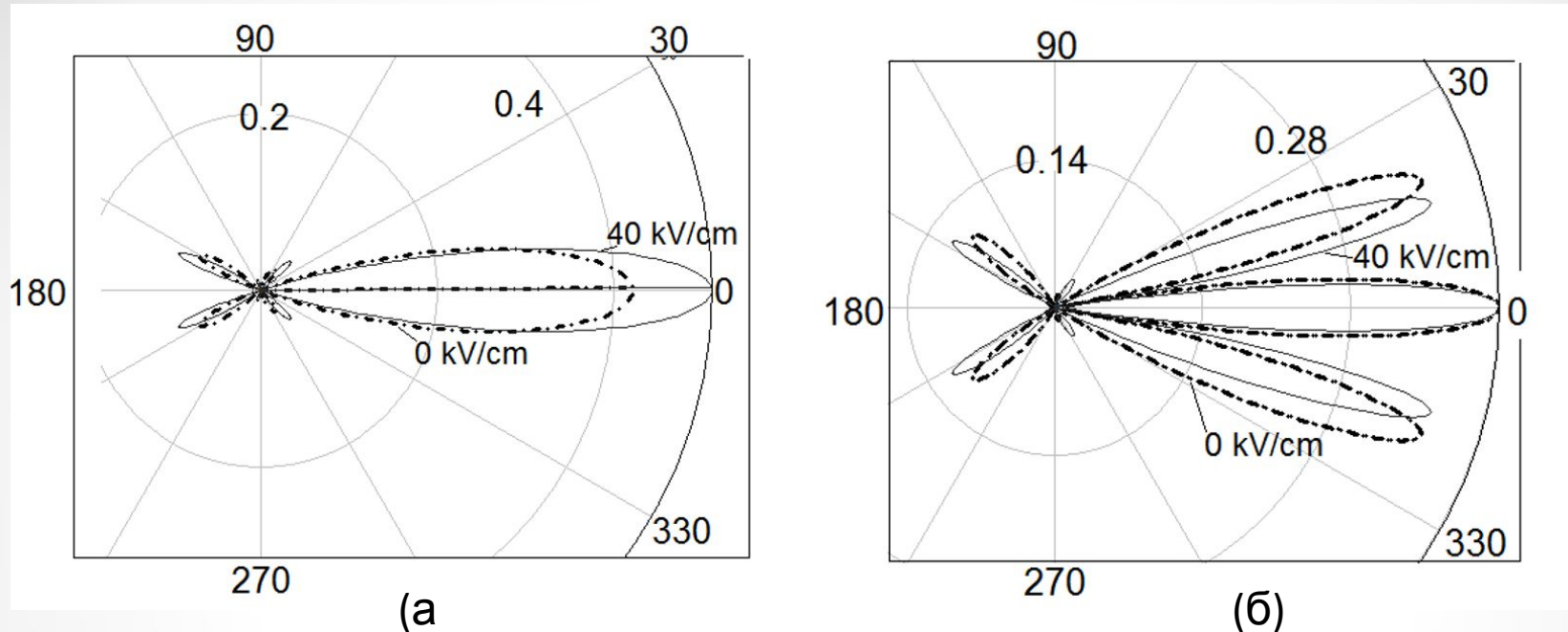


Рис.3. Расчетные диаграммы направленности, исследуемой МПА: (а) в плоскости  $H$  ( $z0x$ ); (б) в плоскости  $E$  ( $z0y$ ).

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.
2. Увеличение постоянного электрического поля приводит почти к линейному росту резонансной частоты структуры. Это происходит за счет двух механизмов: МЭ-эффекта – через изменение эффективного магнитного поля феррита, а также за счет зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя от прикладываемого постоянного электрического поля. Суммарный эффект дает изменение резонансной частоты около 2 ГГц при 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. Спиновые 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 электромагнитно-спиновых волн в несимметричных структурах металл-диэлектрик-ферромагнетик-диэлектрик-металл // 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

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

где:

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

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

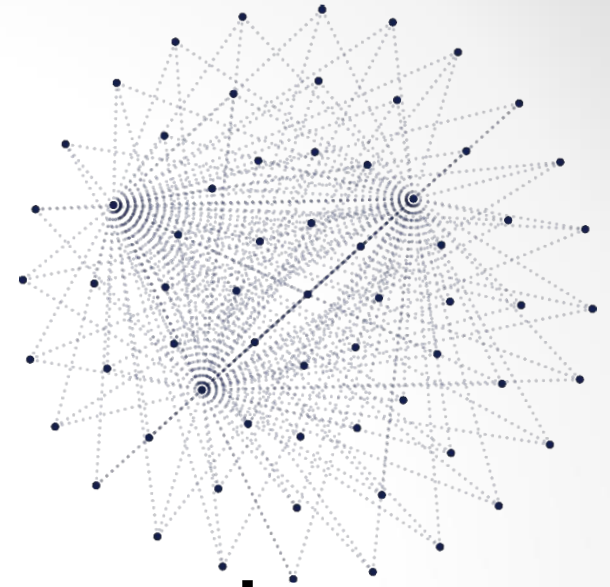
$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (\text{П.4})$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (\text{П.5})$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (\text{П.6})$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \cot(\xi k_0 d))^2}} \left[ \frac{\sin(0.5 k_0 a \sin \theta)}{0.5 k_0 a \sin \theta} \right] \quad (\text{П.7})$$





Спасибо за внимание!