

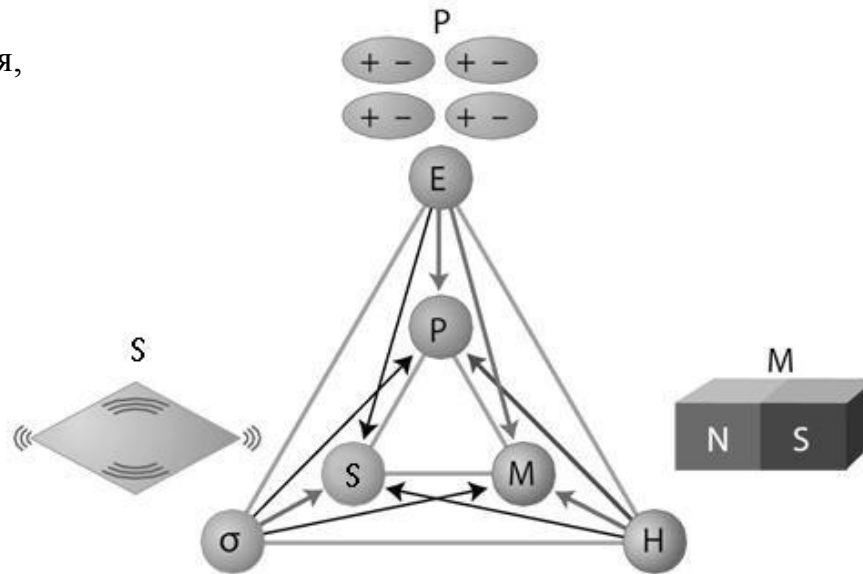
# Метод номограмм для определения магнитоэлектрического эффекта

Леонтьев В.С.

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, white) extending from the right side of the slide towards the center.

# Магнитоэлектрический эффект

$P$  – электрическая поляризация,  
 $E$  – внешнее электрическое поле,  
 $M$  – намагничённость,  
 $H$  – внешнее магнитное поле,  
 $S$  – деформация,  
 $\sigma$  – механическое напряжение.



$H \rightarrow P$  – магнитоэлектрический эффект,  
 $E \rightarrow M$  – обратный магнитоэлектрический эффект,  
 $H \rightarrow S$  – магнитострикционный эффект,  
 $\sigma \rightarrow M$  – магнитоупругий эффект (эффект Виллари),  
 $E \rightarrow S$  – обратный пьезоэлектрический эффект,  
 $\sigma \rightarrow P$  – пьезоэлектрический эффект.

# Расчет магнитоэлектрического коэффициента в структуре

$$\begin{aligned}
 {}^p S_i &= {}^p S_{ij} {}^p T_j + {}^p d_{ki} {}^p E_k \\
 {}^p D_k &= {}^p d_{ki} {}^p T_i + {}^p \epsilon_{kn} {}^p E_n \\
 {}^m S_i &= {}^m S_{ij} {}^m T_j + {}^m q_{ki} {}^m H_k \\
 {}^m B_k &= {}^m q_{ki} {}^m T_i + {}^m \mu_{kn} {}^m H_n
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^p D_n &= {}^m D_n & {}^p S_i &= {}^m S_i, \quad (i=1,2) \\
 {}^p E_\tau &= {}^m E_\tau & {}^p T_i &= -{}^m T_i (1 - \\
 {}^p B_n &= {}^m B_n & & V)/V, \quad {}^p T_3 = {}^m T_3 = 0
 \end{aligned}$$

$$\int_0^L {}^p D \, dx =$$

$$\alpha_{E,31} = \frac{E}{H_1} = \frac{-V(1-V)({}^m q_{11} + {}^m q_{21}) {}^p d_{31}}{{}^p \epsilon_{33} ({}^m S_{12} + {}^m S_{11}) V + \epsilon_{33} ({}^p S_{12} + {}^p S_{11}) (1 - \frac{2}{3}V) - 2 {}^p d^2 (1-V)}$$

# Расчет магнитоэлектрического коэффициента в структуре

$$\alpha_{E,31} = \frac{V(1-V)x}{\varepsilon_0 [{}^m s_{11} V + {}^P s_{11} (1-V)]}$$

$$x = {}^m q_{11} \frac{{}^P d_{31}}{\frac{{}^P \varepsilon_{33}}{\varepsilon_0}}$$

# Обозначения

$E_k$  и  $H_k$  – напряженности электрического и магнитного полей,

${}^m S_i$  – компонент деформации магнитного слоя,

${}^p S_i$  – компонент деформации пьезоэлектрического слоя,

${}^p D_k$  – электрическое смещение пьезоэлектрического слоя,

${}^p T_i$  – компонент механического напряжения в пьезоэлектрической фазе,

${}^p S_{ii}$  – коэффициенты податливости пьезоэлектрика при постоянном электрическом поле,

${}^m T_i$  – компонент механического напряжения в магнитной фазе,

${}^m S_{ii}$  – коэффициенты податливости магнитной фазы при постоянном магнитном поле,

${}^p \epsilon_{33}$  – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика,

${}^p d_{ki}$  – пьезоэлектрический коэффициент пьезоэлектрика,

${}^m q_{ij}$  – пьезомагнитный коэффициент магнитной фазы,

$\mu_{kn}$  – магнитная проницаемость,

${}^m B_3$  – компоненты векторов магнитной индукции,

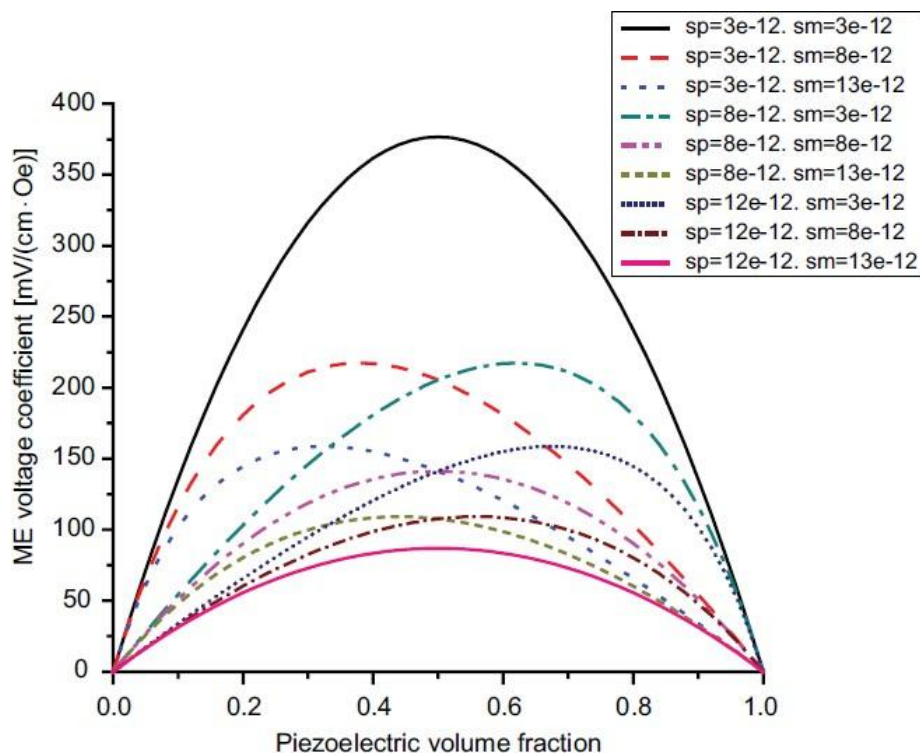
$X$  – коэффициент связи,

$V$  – объемная доля пьезоэлектрика,  $V = {}^p V / ({}^p V + {}^m V)$ ,  ${}^p V$  и  ${}^m V$  объемы пьезоэлектрика и магнетика,

${}^m V$  объемы пьезоэлектрика и магнетика,

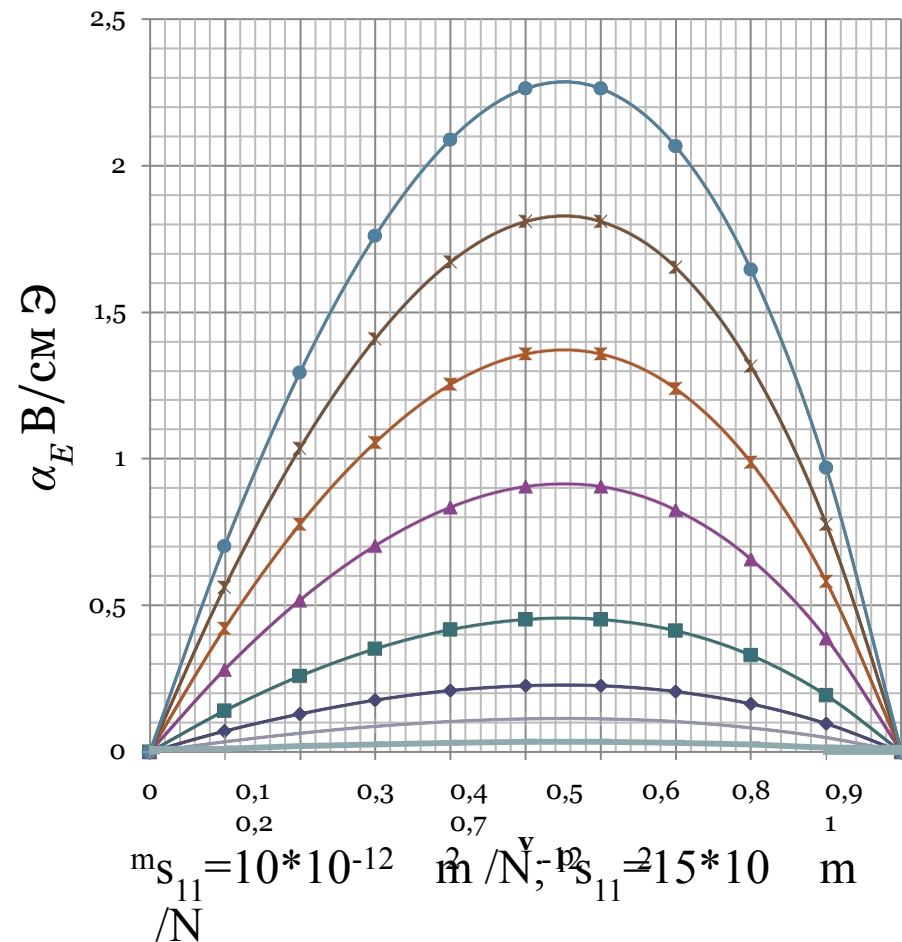
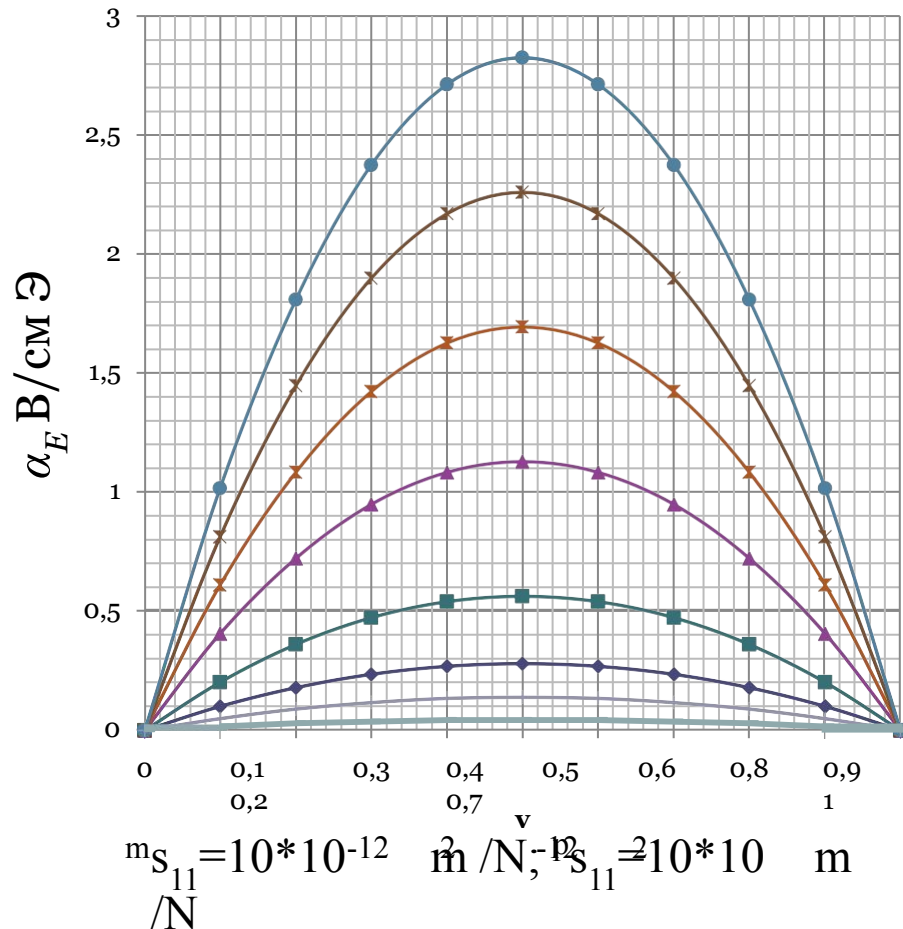
$\alpha_{E,3I}$  – поперечный МЭ коэффициент по напряжению.

# Метод номограмм



Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика для симметричной структуры с различной податливостью магнестрикционных и пьезоэлектрических элементов,  $x = 0,5 \cdot 10^{-22}$  (в единицах СИ)  $x$  – коэффициент пьезомагнитной связи в пьезомагнитной фазе

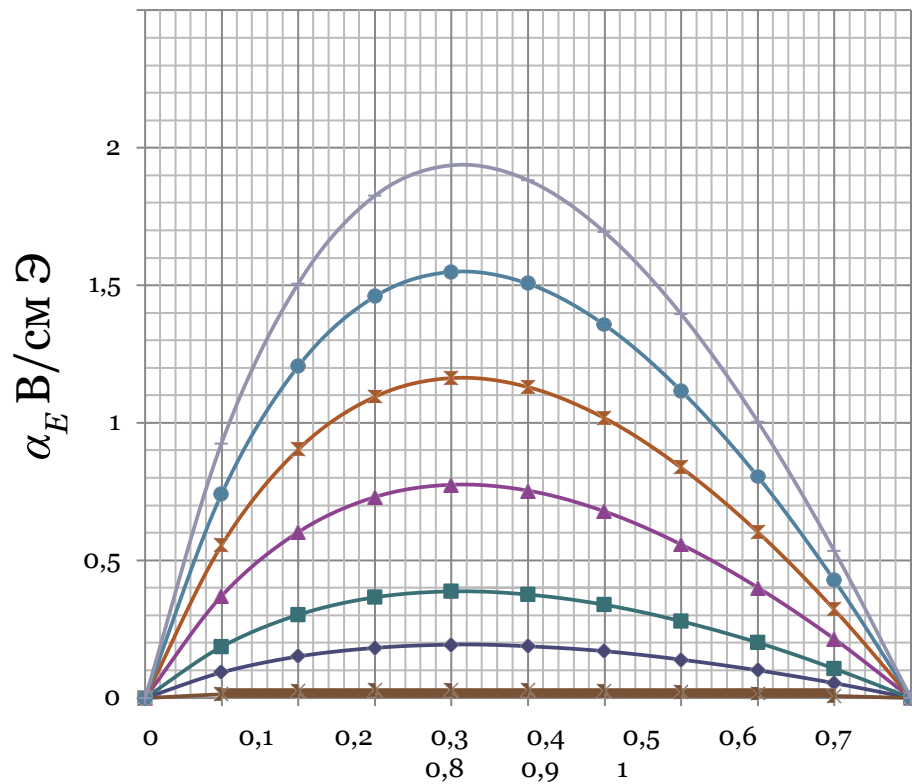
Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика для симметричной структуры с  $X=0,15; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 \cdot 10^{-22}$



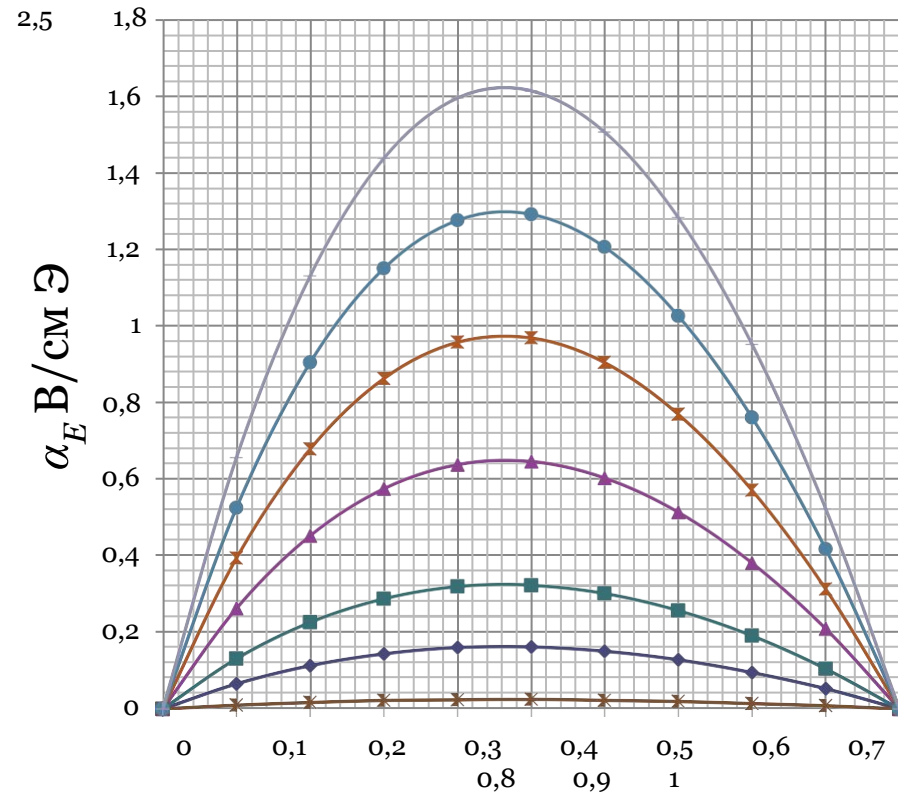




Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика для симметричной структуры с  $X=0,15; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 \cdot 10^{-22}$

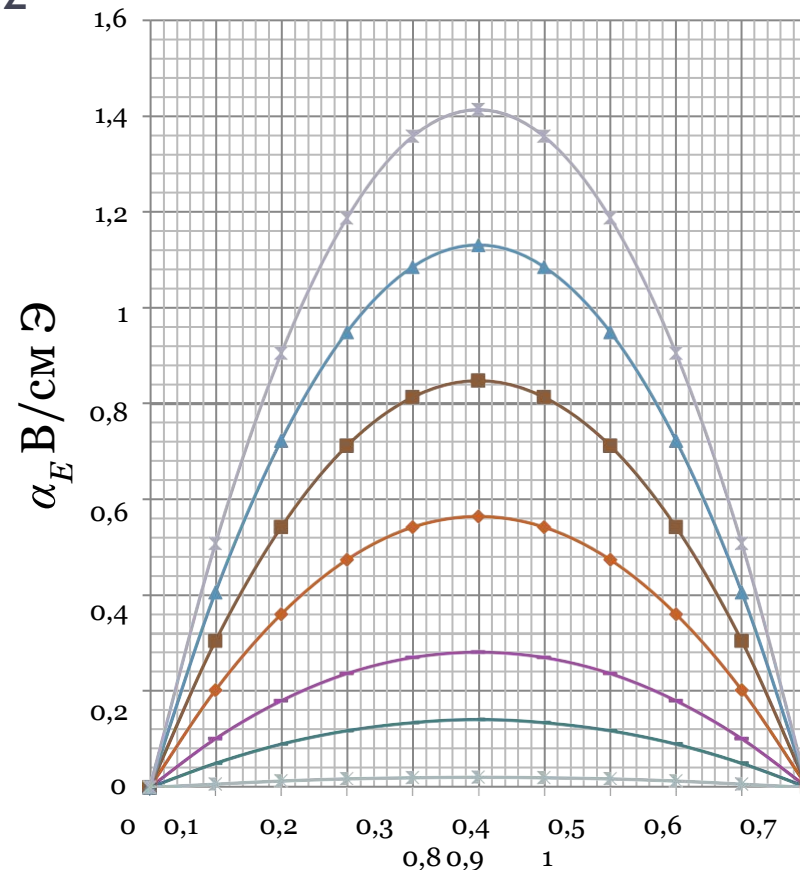


$$m_{S_{11}} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}; \quad \bar{p}_{S_{11}} = 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$



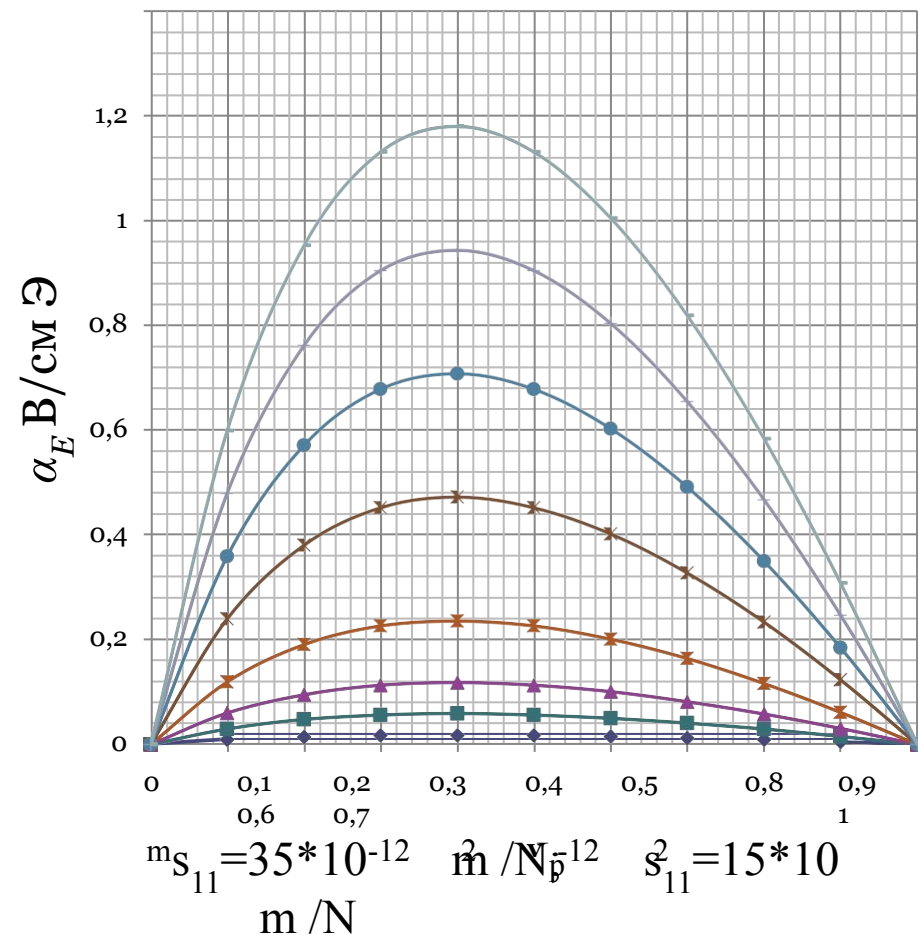
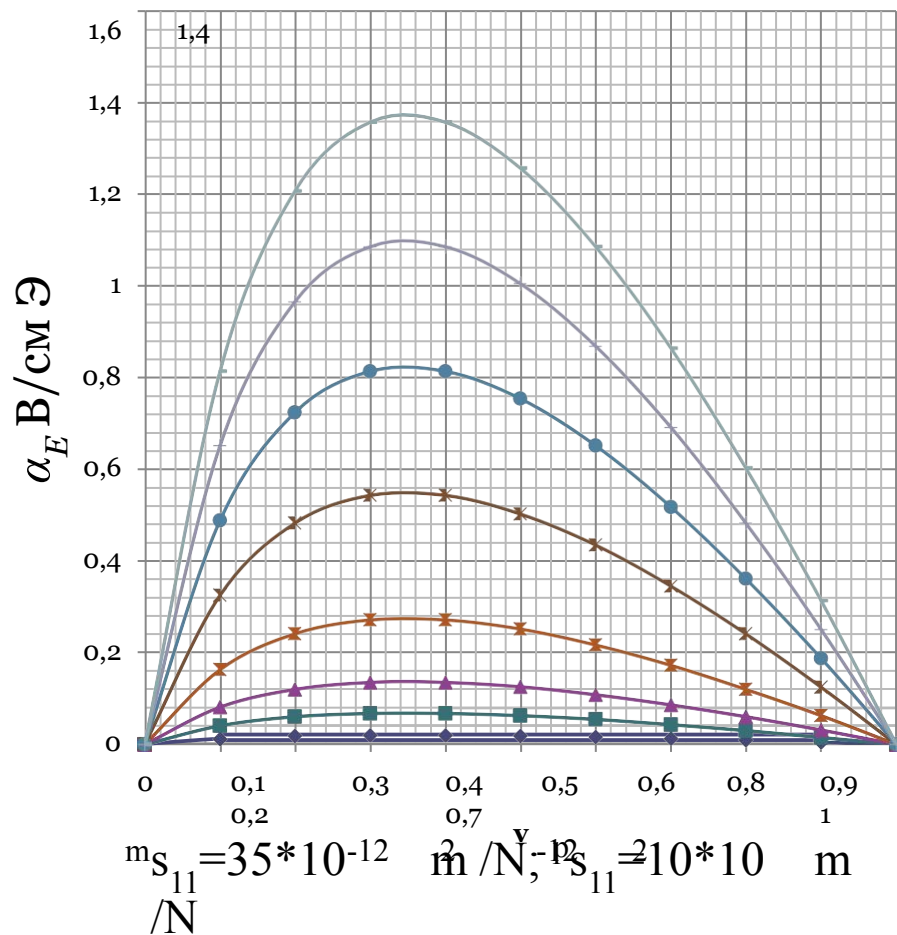
$$m_{S_{11}} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}; \quad \bar{p}_{S_{11}} = 15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика для симметричной структуры с  $X=0,15; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 \cdot 10^{-22}$

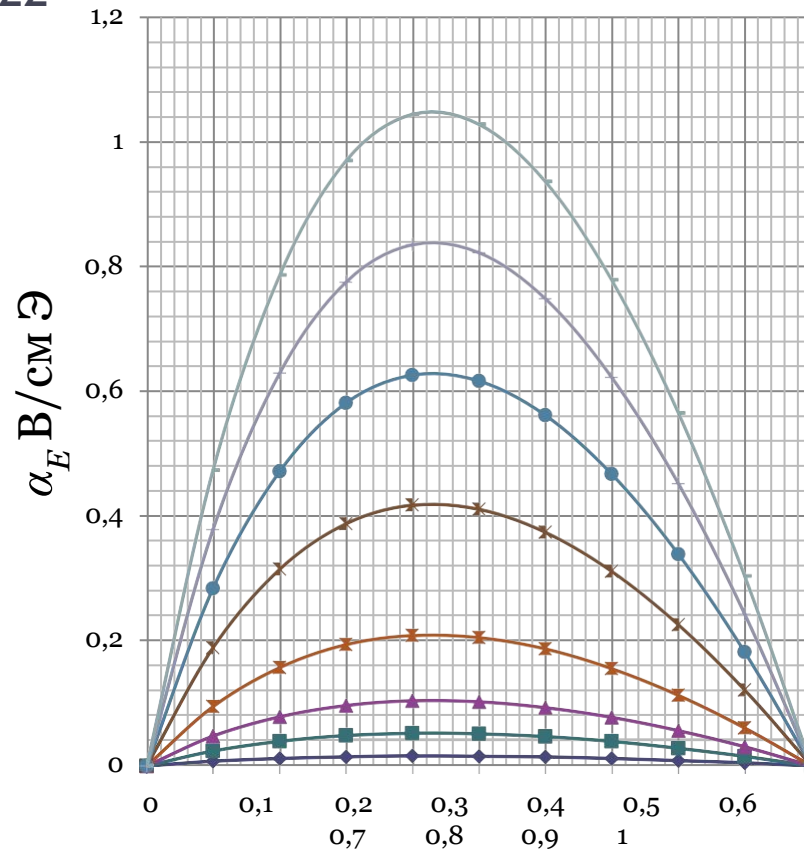


$$m_{S_{11}} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}; \quad p_{S_{11}} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика для симметричной структуры с  $X=0,15; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 \cdot 10^{-22}$



Зависимость поперечного МЭ коэффициента от  
 объемной доли пьезоэлектрика для  
 симметричной структуры с  $X=0,15; 0,5; 1; 2; 4;$   
 $6; 8; 10 \cdot 10^{-22}$



$$m_{S_{11}} = 35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}; \quad p_{S_{11}}^v = 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

# Материальные параметры

Material	$s_{11}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)	$s_{12}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)	$q_{33}$ ( $10^{-12}$ m/A)	$q_{31}$ ( $10^{-12}$ m/A)	$d$ ( $10^{-12}$ m/V)	$\lambda_{100}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$
PZT	15.3	-5	-	-	$d_{31} = -175$	-	1750
BTO	7.3	-3.2	-	-	$d_{31} = -78$	-	1345
PMN-PT	23	-8.3	-	-	-600	-	5000
Langasite	8.8	-4.3	-	-	$d_{14} = -3.65$	-	50
Langatite	9.8	-3.8	-	-	$d_{14} = -2.81$	-	77
Quartz	12.8	-1.8	-	-	$d_{14} = -0.67$	-	4.68
LiNbO <sub>3</sub>	4.9	1.8	-	-	$d_{15} = 69$	-	84.6
AlN	3.1	0.8	-	-	$d_{31} = -2.8$	-	8.8
YIG	6.5	-2.4	-	-	-	1.4	10
NFO	6.5	-2.4	-680	125	-	23	10
LFO	35	-12	-	-	-	46	10
Ni	20	-7	-4140	1200	-	-	-
Terfenol-D	33.3	-10	15,707	4730	-	-	-
Metglas	10	-3.2	14,000	-3000	-	-	-

Спасибо за внимание

Леонтьев Виктор Сергеевич

Тел.: +7-906-200-41-27

Е-mail: [viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:viktorsergeevich.novsu@gmail.com)