

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»  
Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Лабораторная работа на тему:

**СВЯЗАННЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ ЛИНИИ**

**Выполнил:**

**Факультет ИнЭТМ**

**Курс 2**

**Специальность ИКТС**

**Группа б-ИКТСипу-22**

**Ф.И.О: Широченко Г. А.**

**Шифр: 162254**

**Проверил: Дрогайцева О. В.**

Цель работы: исследование электродинамических характеристик связанных коаксиальных линий передачи микроволнового диапазона.

## ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Связанные коаксиальные линии передачи (СКЛП) различной конфигурации широко применяются в современной микроволновой технике. Они образуются несколькими проводниками, как правило, тремя. Наиболее широко используемой является классическая структура, представленная на рис.1, которая формируется одним внешним и двумя внутренними проводниками, симметричными относительно двух продольных плоскостей.

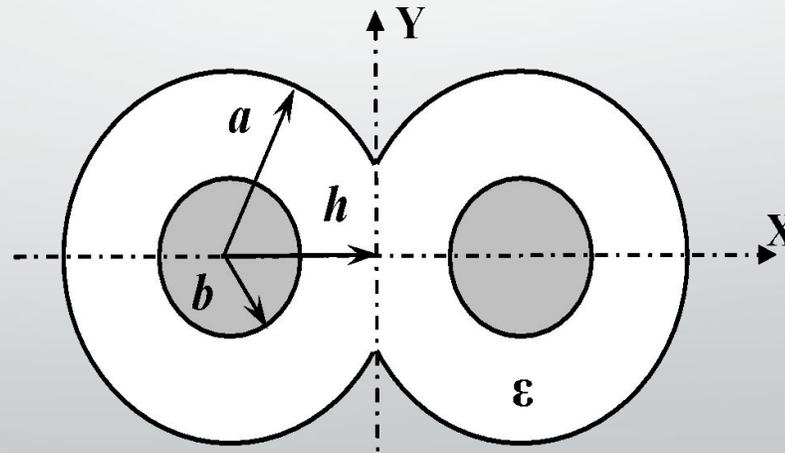


Рис.1. Связанные коаксиальные линии

На ее основе выполняются, в частности, такие важные устройства СВЧ-диапазона, как направленные ответвители (НО). НО представляет собой систему из двух связанных передающих линий, в которой часть мощности электромагнитной (ЭМ) волны, распространяющейся в основной канале, ответвляется только в один из выходов вспомогательного канала. НО является восьмиполюсником (рис.2).

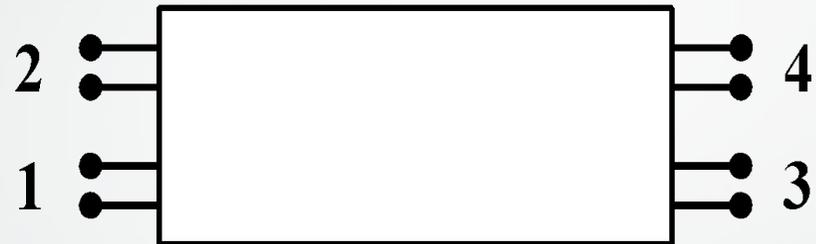


Рис.2. Обобщенная схема направленного ответвителя

Принцип действия НО основан на возбуждении во вспомогательной линии нескольких волн, смещенных по фазе так, что амплитуды волн, распространяющихся в одном из направлений, интерферируя, суммируются, а в противоположном взаимно компенсируются. Такие устройства строятся на основе двух близко расположенных отрезков линий передачи (ЛП), например СКЛП (рис.1), связанных между собой с помощью элементов связи двух типов. Первый тип – элементы связи в виде заградительных ЛП для ЭМ волн, распространяющихся в основном и вспомогательном каналах. Вторым тип – элементы связи в виде ЛП, критическая длина волны которых больше или равна критической длине волны связанных линий.

Если мощность на входе плеча 1 равна  $P_1$ , а на выходах остальных плеч – соответственно  $P_2, P_3$  и  $P_4$ , то основными параметрами, характеризующими работу НО являются: направленность  $N = 10\lg(P_4/P_2)$ , переходное ослабление  $W = 10\lg(P_1/P_4)$ , баланс выходных плеч  $B = 10\lg(P_3/P_4)$ , изоляция  $I = 10\lg(P_1/P_2)$ , КСВН, характеризующий согласование НО при условии, что к остальным плечам подключены согласованные нагрузки, а также диапазон частот, в пределах которого сохраняются требуемые значения параметров  $N, B, W, I$ .

Как и в любой многосвязанной ЛП, основным типом волн в СКЛП (рис.1) является волна типа ТЕМ. При этом, учитывая особенности конфигурации СКЛП, необходимо различать четный (even) и нечетный (odd) низшие типы волн. Для успешного согласования НО на СКЛП с входными и выходными трактами, необходимо определить такой параметр, как волновое сопротивление ( $Z_0$ ).

В работе (3) методом конечных элементов (МКЭ) были установлены зависимости волнового сопротивления четного ( $Z_0^e$ ) и нечетного ( $Z_0^o$ ) типов волн, распространяющихся в СКЛП от ее размеров. Там же были получены аналитические соотношения, аппроксимирующие эти зависимости:

$$Z_0^e = Z + u_1q + u_2q^2 + u_3q^3 \quad (1)$$

$$Z = -31.626 + 45.864d - 5.623d^2 + 0.354d^3 - 0.0085d^4 \quad (2)$$

$$u_1 = 0.862 - 2.982d + 1.841d^2 - 0.148d^3 + 0.0039d^4 \quad (3)$$


$$u_2 = -6.862 + 24.858d - 8.728d^2 + 0.69d^3 - 0.018d^4 \quad (4)$$

$$u_3 = -20.311 + 4.254d + 4.289d^2 - 0.404d^3 + 0.011d^4 \quad (5)$$

$$q = \frac{\arccos\left(\frac{h}{a}\right)}{\arccos\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (6)$$

где  $0 \leq q \leq 0,99$

$$d = \frac{a}{b} \quad (7)$$

где  $1,4 \leq d \leq 15$

$$Z_0^o = \frac{w_1 - w_2}{1 + \exp\left(\frac{q - q_0}{s}\right)} + w_2 \quad (8)$$

$$w_1 = -37.78 + 50.089d - 6.398d^2 + 0.417d^3 - 0.01d^4 \quad (9)$$

$$w_2 = 310.831 - 366.622d + 47.908d^2 - 3.263d^3 + 0.083d^4 \quad (10)$$

$$q_0 = 1.407 - 0.017d + 0.0024d^2 - 1.507 \cdot 10^{-4} d^3 + 3.554 \cdot 10^{-6} d^4 \quad (11)$$

$$s = 0.153 + 0.0045d - 11 \cdot 10^{-4} d^2 + 8.483 \cdot 10^{-5} d^3 - 2.21 \cdot 10^{-6} d^4 \quad (12)$$

**Пример тестирования соотношений (1) – (12). Имеется направленный ответвитель на связанных коаксиальных линиях (рис.1) с воздушным заполнением ( $\varepsilon = 1$ ) и размерами:  $a = 0.51$  мм,  $b = 0.255$  мм,  $q = 0.7$ . Значения волновых сопротивлений четного (1) и нечетного (8) типов волн равны:  $Z_0^e = 48.3513$  Ом и  $Z_0^o = 36.034$  Ом.**

**В работе [4] были сформулированы другие аналитические соотношения в приближении слабой связи для волновых сопротивлений двух низших типов волн:**

$$Z_0^e = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln(Atgf) \quad (13)$$

$$Z_0^o = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln\left(\frac{A}{2} \sin 2f\right) \quad (14)$$

$$A = \frac{d(2\pi - Q)}{\pi \sin 0.5Q} \quad (15)$$

$$Q = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{(0.5 + 2h)^2 - a^2}}{0.5 + 2h} \right) \quad (16)$$

$$f = \frac{0.5\pi Q}{2\pi - Q} \quad (17)$$

**Соотношения (13) – (17) могут применяться  $K < 0.1$ , где  $K$  – коэффициент связи, определяемый из выражения:**

$$K = \frac{Z_0^e - Z_0^o}{Z_0^e + Z_0^o} \quad (18)$$

# ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТ

- 2.1. Составить алгоритм и программу расчета волновых сопротивлений четных и нечетных типов волн в СКЛП с использованием соотношений (1) – (12) и сделать проверку с помощью тестового примера.
- 2.2. В соответствии с вариантом задания (см. табл.1), провести расчет зависимостей волнового сопротивления типов волн, распространяющейся в СКЛП от ее нормированных размеров в диапазоне  $1.5 \leq d \leq 10$ .
- 2.3. Проверить выполнение условия  $K < 0.1$ , где параметр  $K$  определяется из уравнения (18).
- 2.4. Для решений, удовлетворяющих условию  $K < 0.1$  дополнительно провести расчет аналогичных зависимостей, используя соотношения (13) – (17) и сравнить результаты расчета, оценив относительную погрешность вычислений по формуле:

$$\Delta = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_{\max}} \cdot 100\%$$

где  $Z_{\max}$  и  $Z_{\min}$  – максимальное и минимальное значения волнового сопротивления.

№	a, мм	h, мм
35	2	1.75

## Реализация основного кода в MatLab:

```
clear, clc; % очистка рабочей области и данных
a=2*power(10,-3); % значение a (мм)
h=1.75*power(10,-3); % значение h (мм)
d=(1.5:0.25:10);
u1=0.862-2.982.*d+1.841.*(d.^2)-0.148.*(d.^3)+0.0039.*(d.^4);
u2=-6.862+24.858.*d-8.728.*(d.^2)+0.69.*(d.^3)-0.018.*(d.^4);
u3=-20.311+4.254.*d+4.289.*(d.^2)-0.404.*(d.^3)+0.011.*(d.^4);
z=-31.626+45.864.*d-5.623.*(d.^2)+0.354.*(d.^3)-0.0085.*(d.^4);
q=qget(a, h, d);
q0=1.407-0.017.*d+0.0024.*(d.^2)-1.507.*(d.^3).*(10^(-4))+3.554.*(d.^4).*(10^(-6));
w1=-37.78+50.089.*d-6.398.*(d.^2)+0.417.*(d.^3)-0.01.*(d.^4);
w2=310.831-366.622.*d+47.908.*(d.^2)-3.263.*(d.^3)+0.083.*(d.^4);
s=0.153+0.0045.*d-11.*(d.^2).*(10^(-4))+8.483.*(d.^3).*(10^(-5))-2.21.*(d.^4).*(10^(-6));
z01=z+u1.*q+u2.*(q.^2)+u3.*(q.^3);
z00=((w1-w2)./(1+exp((q-q0)./s))+w2);
k=kget(z01, z00);
qb=2*atan((sqrt(((0.5+2*h)^2)-(a^2)))/(0.5+2*h));
f=(0.5*pi*qb)/(2*pi-qb);
ab=aget(d, qb);
zb01=60.*log(ab.*tan(f));zb00=60.*log((ab./2).*sin(2*f));
kb=kget(zb01, zb00);
dz01=delt(z01, zb01);
dz00=delt(z00, zb00);
sdz=dz00./dz01;
disp(['      d      zb01      z01      zb00      z00      kb      k      dz01      dz00'])
disp(['d' zb01' z01' zb00' z00' kb' k' dz01' dz00'])
figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
set(0, 'DefaultAxesFontSize',14, 'DefaultAxesFontName', 'Times New Roman');
set(0, 'DefaultTextFontSize',14, 'DefaultTextFontName', 'Times New Roman');
```

Продолжение основного кода в MatLab:

```
plot (d',[z01' z00'])
title('Тестирование соотношений [1-12]');
xlabel('Изменение размеров СКЛП');
ylabel('Волновое сопротивление');
legend('Волновое сопротивление чётного типа волн','Волновое сопротивление нечётного типа волн');
grid on;
figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName','Times New Roman');
plot (d',[zb01' zb00'])
title('Тестирование соотношений [13-17]');
xlabel('Изменение размеров СКЛП');
ylabel('Волновое сопротивление');
legend('Волновое сопротивление чётного типа волн','Волновое сопротивление нечётного типа волн');
grid on;
figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName','Times New Roman');
plot (d',[k' kb'])
title('Коэффициент связи');
xlabel('Изменение размеров СКЛП');
ylabel('Коэффициент связи');
legend('Для соотношений [1-12]','Для соотношений [13-17]');
grid on;
figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
set(0,'DefaultTextFontSize',14,'DefaultTextFontName','Times New Roman');
plot(d',[dz01' dz00' sdz'])
title('Относительная погрешность и её соотношение');
xlabel('Изменение размеров СКЛП');
```

Продолжение основного кода в MatLab:

```
ylabel('Относительная погрешность');  
legend('Погрешность волнового сопротивления чётного типа волн', 'Погрешность волнового  
сопротивления нечётного типа волн', 'Соотношение погрешностей');  
grid on;
```

Перечень функций:

```
function a = aget(d, q)  
a = (d*(2*pi-q))./(pi*sin(0.5*q));  
end
```

```
function k = kget(z1, z0)  
k = (z1-z0)./(z1+z0);  
end
```

```
function q = qget(a, h, d)  
q = (acos(h/a))./(acos(d.^(-1)));  
end
```

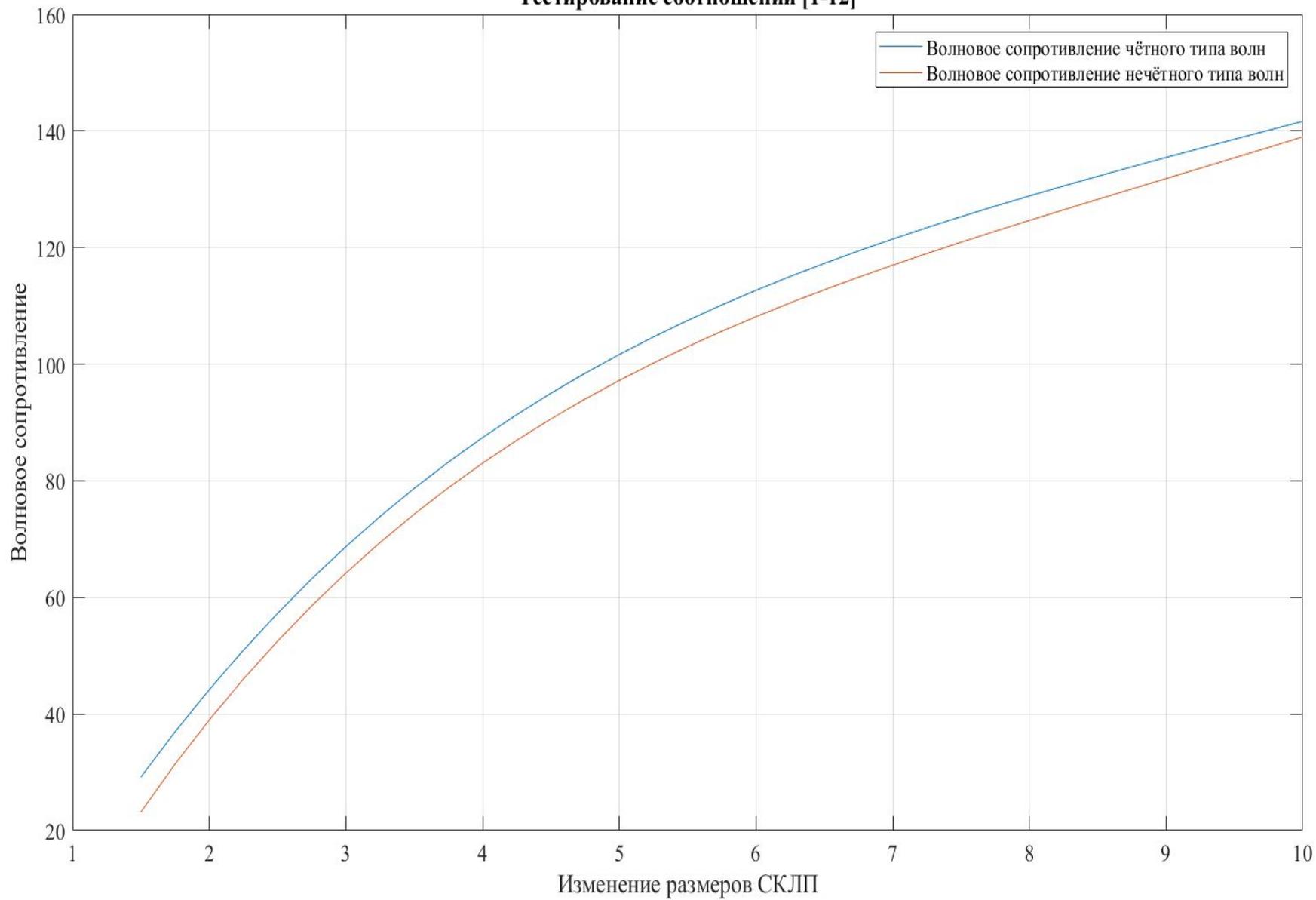
```
function dlt = delt(zm, zn)  
am=[];  
am=[zm; zn];  
for i=1:length(am)  
    amax=max(am);  
    amin=min(am);  
    dlt = ((amax-amin)./amax)*100;  
end  
end
```

Результат работы  
программы:  
Итоги для  
соотношений с [1-12]:

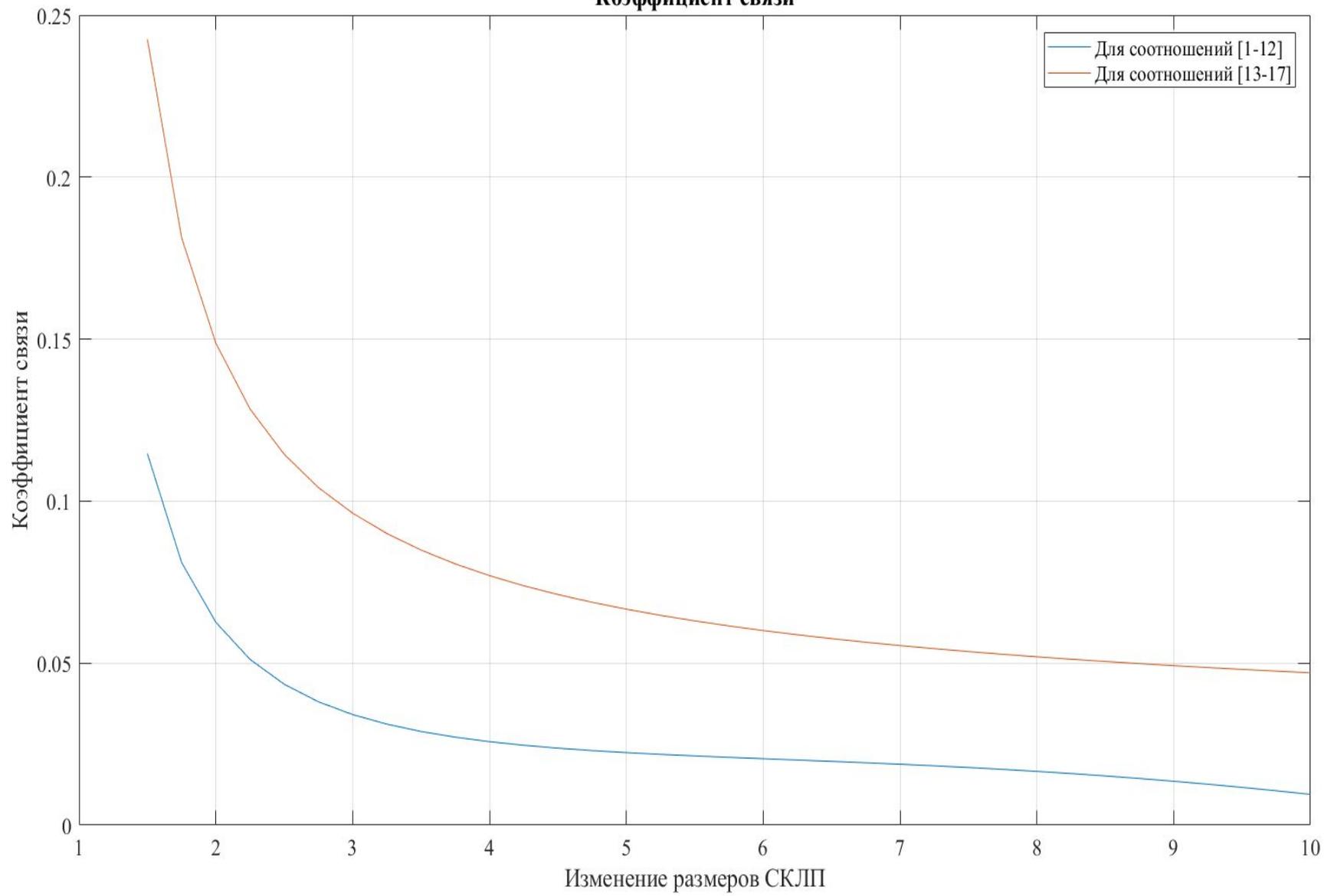
Отсюда мы можем  
видеть:  
Что выполнение  
условия  $k < 0,1$   
наступает при  
соотношении размеров  
СКЛП  $10 \geq d \geq 2,9$ .

d	zb01	z01	zb00	z00	kb	k	dz01	dz00
1.5000	34.0018	29.1911	20.7256	23.1868	0.2426	0.1146	14.1484	10.6147
1.7500	43.2508	36.9536	29.9746	31.4130	0.1813	0.0810	14.5597	4.5789
2.0000	51.2627	44.1825	37.9865	38.9769	0.1488	0.0626	13.8115	2.5410
2.2500	58.3297	50.9468	45.0535	45.9897	0.1284	0.0511	12.6571	2.0357
2.5000	64.6513	57.2758	51.3751	52.5045	0.1144	0.0435	11.4081	2.1510
2.7500	70.3699	63.1937	57.0937	58.5601	0.1042	0.0381	10.1978	2.5040
3.0000	75.5906	68.7238	62.3144	64.1897	0.0963	0.0341	9.0841	2.9216
3.2500	80.3932	73.8893	67.1170	69.4239	0.0900	0.0312	8.0901	3.3230
3.5000	84.8396	78.7126	71.5634	74.2910	0.0849	0.0289	7.2219	3.6714
3.7500	88.9792	83.2159	75.7030	78.8181	0.0806	0.0271	6.4771	3.9522
4.0000	92.8515	87.4209	79.5753	83.0308	0.0770	0.0258	5.8487	4.1617
4.2500	96.4890	91.3484	83.2128	86.9538	0.0739	0.0246	5.3277	4.3023
4.5000	99.9185	95.0186	86.6423	90.6106	0.0712	0.0237	4.9039	4.3795
4.7500	103.1625	98.4509	89.8863	94.0235	0.0688	0.0230	4.5672	4.4001
5.0000	106.2401	101.6641	92.9639	97.2139	0.0666	0.0224	4.3072	4.3718
5.2500	109.1675	104.6761	95.8913	100.2025	0.0647	0.0218	4.1143	4.3024
5.5000	111.9587	107.5040	98.6825	103.0085	0.0630	0.0214	3.9789	4.1996
5.7500	114.6258	110.1642	101.3496	105.6506	0.0615	0.0209	3.8924	4.0709
6.0000	117.1794	112.6722	103.9032	108.1463	0.0601	0.0205	3.8464	3.9235
6.2500	119.6287	115.0427	106.3525	110.5124	0.0587	0.0201	3.8335	3.7641
6.5000	121.9820	117.2898	108.7058	112.7645	0.0576	0.0197	3.8466	3.5993
6.7500	124.2464	119.4264	110.9702	114.9176	0.0564	0.0192	3.8794	3.4350
7.0000	126.4285	121.4650	113.1523	116.9855	0.0554	0.0188	3.9259	3.2767
7.2500	128.5339	123.4170	115.2577	118.9813	0.0545	0.0183	3.9810	3.1295
7.5000	130.5680	125.2931	117.2918	120.9170	0.0536	0.0178	4.0400	2.9981
7.7500	132.5354	127.1032	119.2592	122.8039	0.0527	0.0172	4.0987	2.8865
8.0000	134.4403	128.8564	121.1642	124.6523	0.0519	0.0166	4.1535	2.7983
8.2500	136.2866	130.5608	123.0105	126.4715	0.0512	0.0159	4.2013	2.7366
8.5000	138.0778	132.2239	124.8016	128.2700	0.0505	0.0152	4.2395	2.7040
8.7500	139.8171	133.8524	126.5409	130.0554	0.0498	0.0144	4.2661	2.7023
9.0000	141.5073	135.4519	128.2311	131.8343	0.0492	0.0135	4.2792	2.7331
9.2500	143.1513	137.0275	129.8751	133.6125	0.0486	0.0126	4.2778	2.7972
9.5000	144.7514	138.5833	131.4752	135.3947	0.0481	0.0116	4.2611	2.8949
9.7500	146.3099	140.1226	133.0337	137.1849	0.0475	0.0106	4.2289	3.0260
10.0000	147.8290	141.6481	134.5528	138.9860	0.0470	0.0095	4.1811	3.1897

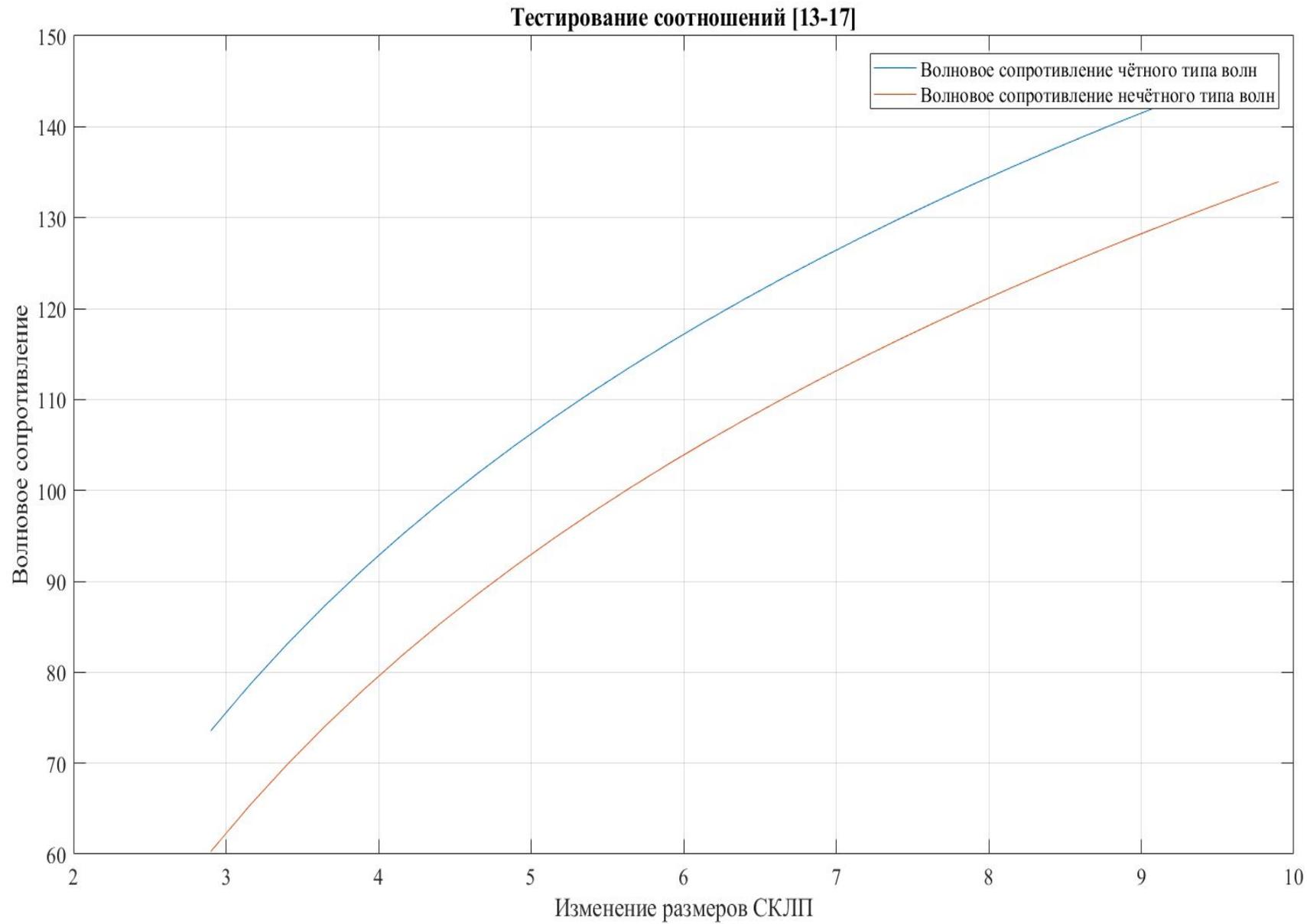
Тестирование соотношений [1-12]



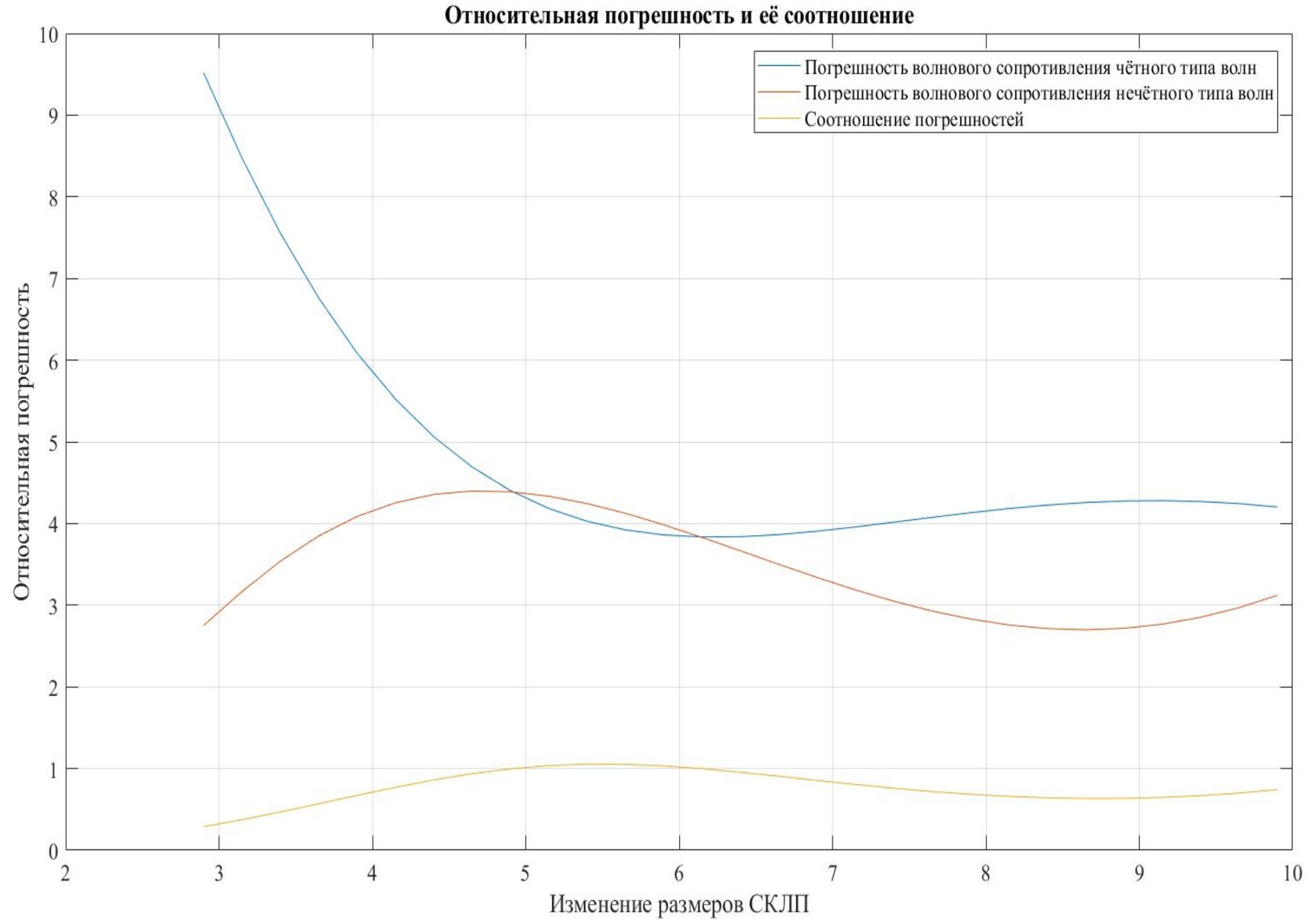
### Коэффициент связи



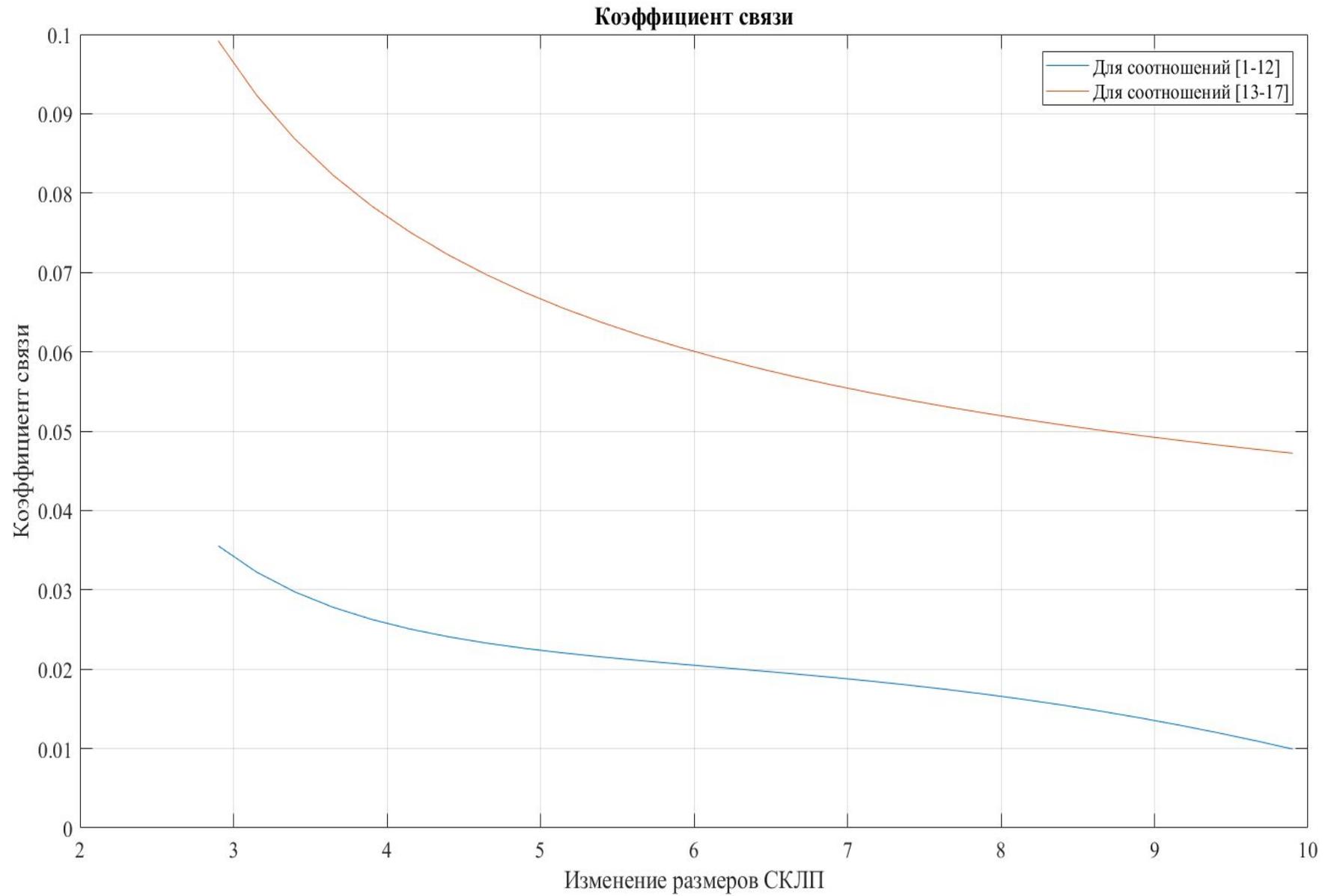
# Результат при выполнении условия $k < 0,1$



# Результат при выполнении условия $k < 0,1$



# Результат при выполнении условия $k < 0,1$



## Литература

- **Синтез сверхширокополосных микроволновых структур / А.М. Богданов, М.В. Давидович, Б.М. Кац и др.; Под ред. А.П. Креницкого и В.П. Мещанова – М.: Радио и связь, 2005. – 514 с.**
- **Djordjevich A.R., Darco D., Goran M.C., Sarkan T.K. Circuit analysis models for multiconductors transmission lines. – Norwood: Artech House, 1997.**
- **Benahmed N., Feham M. Rigorous analytical expressions for electromagnetic parameters of transmission lines: coupled sliced coaxial cable // Microwave Journal, 2001, vol. 44, N 11, pp. 130-138.**
- **Monteath G.D. Coupled transmission lines as symmetrical directional couplers // Proceedings IEE, 1955, vol. 102, pt. B., p. 383-392.**