

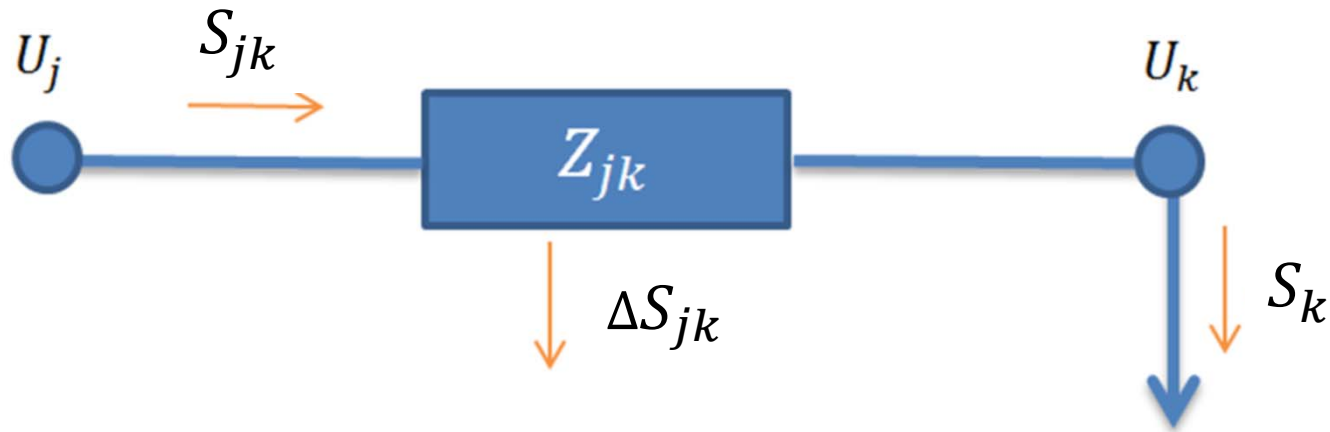
**Электрическое  
сопротивление  
кабельных линий,  
состоящих из кабелей с изоляцией  
из сшитого полиэтилена**

М.И. Фурсанов, И.И. Дуль

1. Постановка задачи.
2. Расчетная модель.
3. Условия расчета.
4. Результаты расчета сопротивлений КЛ.

# 1. Постановка задачи

3



$$S_{jk}^{max} = S_k^{max} + \Delta S_{jk}^{max}$$

$$S_{jk}^{min} = S_k^{min} + \Delta S_{jk}^{min}$$

$$S_k = f(U_k, S_{\text{наг}})$$

$$\Delta S_{jk} = f(U_j, U_k, \mathbf{Z}_{jk})$$

где

$j, k$  – индексы узлов;

$S$  – поток мощности по элементу сети;

$U$  – напряжение в узле;

$Z$  – сопротивление элемента сети.

## 2. Расчетная модель

4

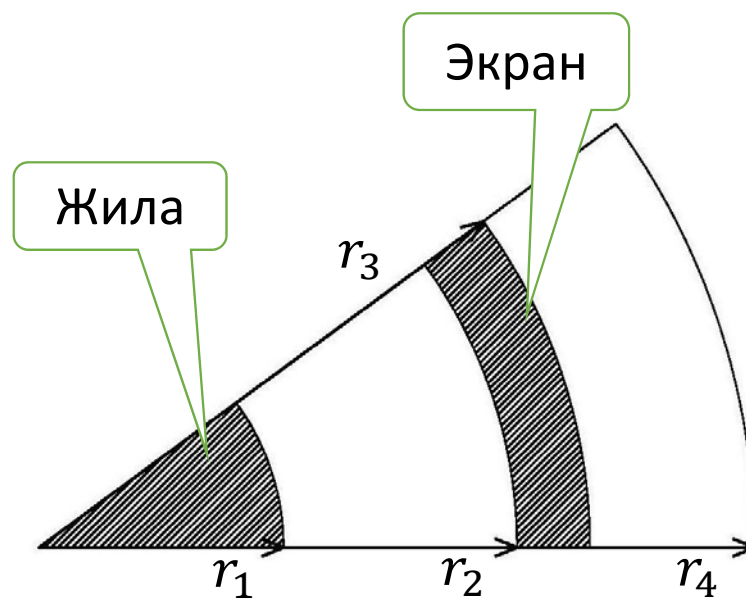
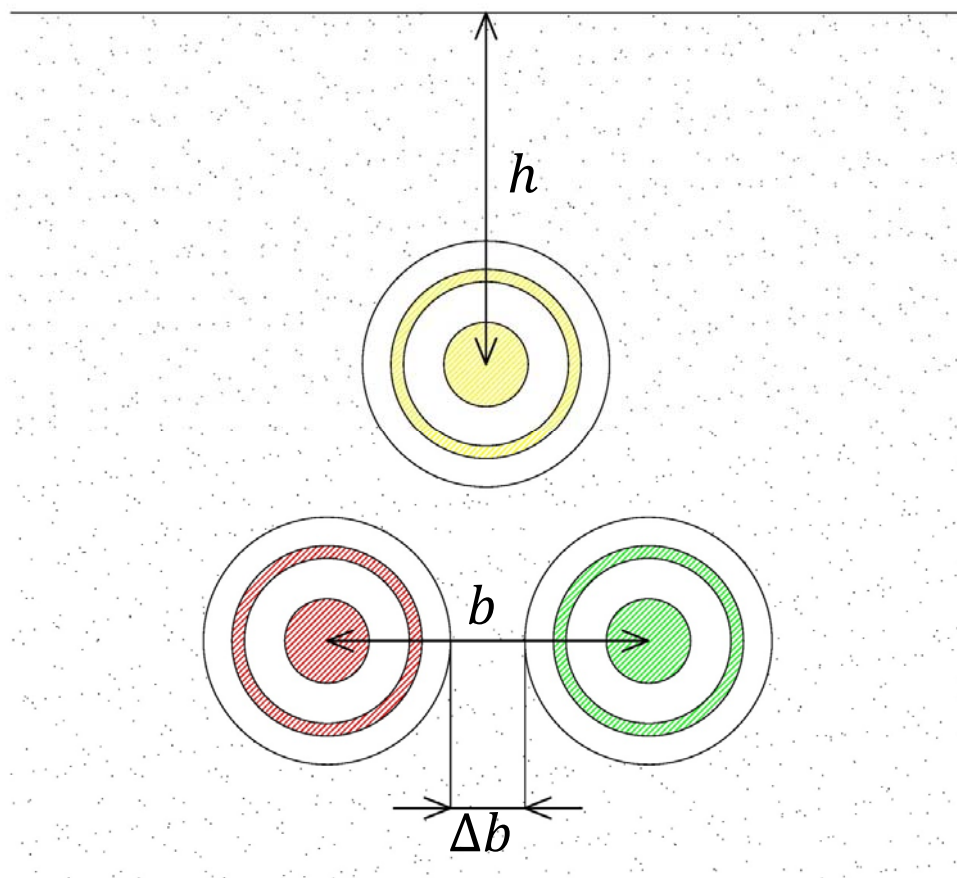


Схема расположения кабелей в трехфазной кабельной линии и схема размеров одножильных кабелей

## 2. Расчетная модель

Матрица собственных и взаимных сопротивлений для КЛ:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \ddots & \text{фаза } A & \text{экран } A & \text{фаза } B & \text{экран } B & \text{фаза } C & \text{экран } C \\ \text{фаза } A & \underline{Z}_{ж} & \underline{Z}_{жэ} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{ac} \\ \text{экран } A & \underline{Z}_{жэ} & \underline{Z}_{э} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{ac} \\ \text{фаза } B & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ж} & \underline{Z}_{жэ} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{bc} \\ \text{экран } B & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{жэ} & \underline{Z}_{э} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{bc} \\ \text{фаза } C & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{ж} & \underline{Z}_{жэ} \\ \text{экран } C & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{ac} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{bc} & \underline{Z}_{жэ} & \underline{Z}_{э} \end{bmatrix}$$

где  
 $\underline{Z}_{ж}$  – собственное сопротивление жилы;  
 $\underline{Z}_{э}$  – собственное сопротивление экрана;  
 $\underline{Z}_{жэ}$  – взаимное сопротивление между жилой и экраном кабеля;  
 $\underline{Z}_{ab}$ ,  $\underline{Z}_{bc}$ ,  $\underline{Z}_{ac}$  – взаимное сопротивление жилы (экрана) одной фазы и жилы (экрана) другой фазы.

## 2. Расчетная модель

1) экраны кабелей заземлены с двух сторон:

$$\underline{Z}_1 = (\underline{Z}_ж - \underline{Z}_к) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} - \underline{Z}_к)^2}{\underline{Z}_э - \underline{Z}_к};$$

$$\underline{Z}_0 = (\underline{Z}_ж + 2\underline{Z}_к) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} + 2\underline{Z}_к)^2}{\underline{Z}_э + 2\underline{Z}_к};$$

2) экраны кабелей заземлены с одной стороны:

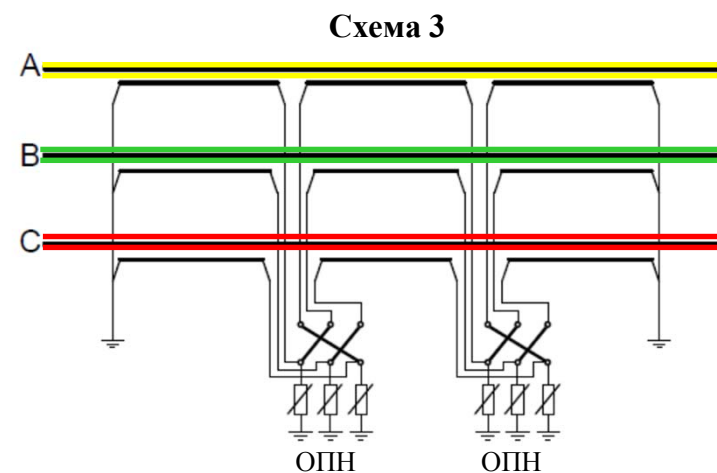
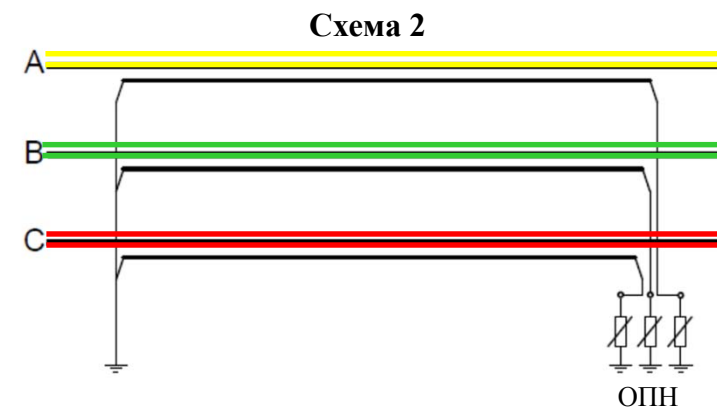
$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_ж - \underline{Z}_к;$$

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_ж + 2\underline{Z}_к;$$

3) выполнена транспозиция экранов кабелей:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_ж - \underline{Z}_к;$$

$$\underline{Z}_0 = (\underline{Z}_ж + 2\underline{Z}_к) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} + 2\underline{Z}_к)^2}{\underline{Z}_э + 2\underline{Z}_к}$$



## 2. Расчетная модель

Собственные и взаимные сопротивления жил и экранов:

$$Z_{\text{ж}} = Z_1^{\text{п}} + Z_2^{\text{п}} + Z_3^{\text{п}} + Z_5^{\text{п}} + Z_6^{\text{п}} + Z_7^{\text{п}} - 2Z_4^{\text{п}};$$

$$Z_{\text{э}} = Z_5^{\text{п}} + Z_6^{\text{п}} + Z_7^{\text{п}};$$

$$Z_{\text{жэ}} = Z_5^{\text{п}} + Z_6^{\text{п}} + Z_7^{\text{п}} - Z_4^{\text{п}};$$

где

$Z_1^{\text{п}}$  – сопротивление внешней поверхности жилы;

$Z_2^{\text{п}}$  – сопротивление, обусловленное магнитным полем в изоляции кабеля между жилой и экраном;

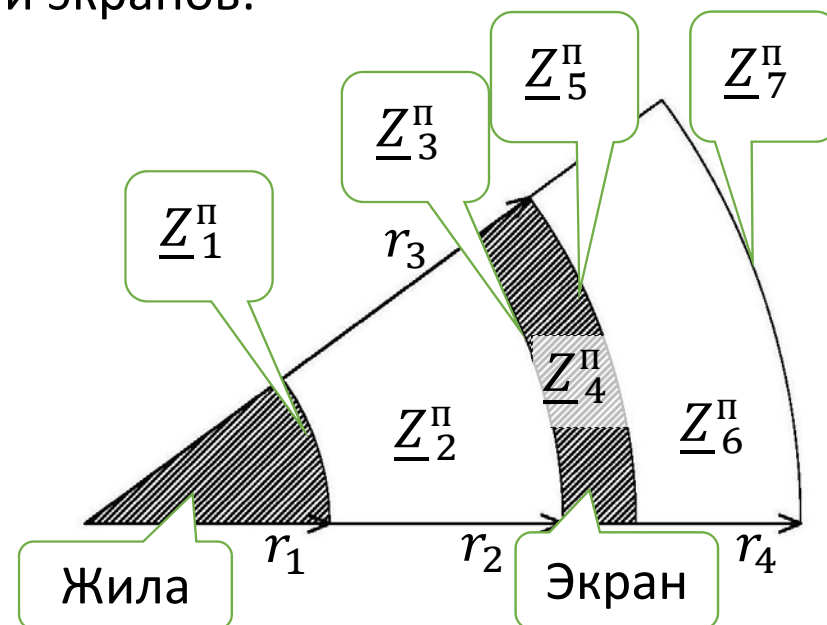
$Z_3^{\text{п}}$  – сопротивление внутренней поверхности экрана;

$Z_4^{\text{п}}$  – взаимное сопротивление между внутренней и внешней поверхностью экрана;

$Z_5^{\text{п}}$  – сопротивление внешней поверхности экрана;

$Z_6^{\text{п}}$  – сопротивление, обусловленное магнитным полем в оболочке кабеля;

$Z_7^{\text{п}}$  – сопротивление поверхности земли окружающей кабель.



## 2. Расчетная модель

Составляющие сопротивлений получены на основании теории о распространении электромагнитной волны в каналах

$$\underline{Z}_1^\Pi = \frac{m_{ж}\rho_{ж}}{2\pi r_1} \cdot \frac{I_0(m_{ж}r_1)}{I_1(m_{ж}r_1)}; \quad \underline{Z}_2^\Pi = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1};$$

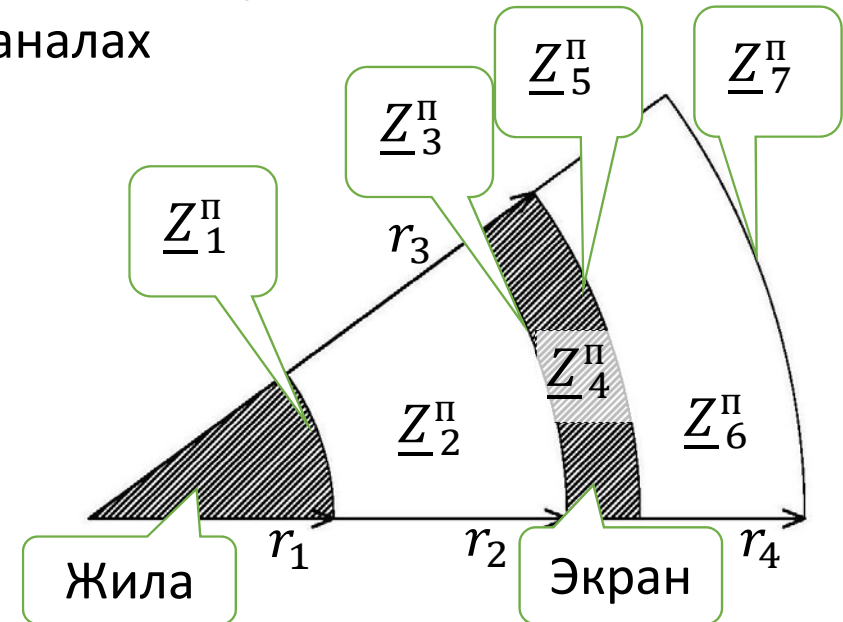
$$\underline{Z}_3^\Pi = \frac{m_{э}\rho_{э}}{2\pi r_2} \cdot \frac{I_0(m_{э}r_2)I_1(m_{э}r_3) + K_0(m_{э}r_2)I_1(m_{э}r_3)}{I_1(m_{э}r_3)I_1(m_{э}r_2) - I_1(m_{э}r_2)K_1(m_{э}r_3)};$$

$$\underline{Z}_4^\Pi = \frac{\rho_{э}}{2\pi(r_2 + r_3)} \cdot \frac{1}{I_1(m_{э}r_3)I_1(m_{э}r_2) - I_1(m_{э}r_2)K_1(m_{э}r_3)};$$

$$\underline{Z}_5^\Pi = \frac{m_{э}\rho_{э}}{2\pi r_3} \cdot \frac{I_0(m_{э}r_3)I_1(m_{э}r_2) + K_0(m_{э}r_3)I_1(m_{э}r_2)}{I_1(m_{э}r_3)I_1(m_{э}r_2) - I_1(m_{э}r_2)K_1(m_{э}r_3)};$$

$$\underline{Z}_6^\Pi = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3};$$

$$\underline{Z}_7^\Pi = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \left( -\ln \frac{1.781m_{э}r_4}{2} + \frac{1}{2} - \frac{4}{3}m_{э}h \right),$$



$$\underline{Z}_{ab} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \left( -\ln \frac{1.781m_{э}S_{ab}}{2} + \frac{1}{2} - \frac{2}{3}m_{э}(h_a + h_b) \right);$$

$\underline{Z}_{bc} = \dots$  аналогично  $\dots$ ;

$\underline{Z}_{ac} = \dots$  аналогично  $\dots$ ;



## 2. Расчетная модель

Составляющие сопротивлений получены на основании теории о распространении электромагнитной волны в каналах

$$\underline{m}_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_{\text{ж}}}}, \underline{m}_{\text{э}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_{\text{э}}}}, \underline{m}_{\text{з}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_{\text{з}}}} - \text{приведенное волновое}$$

число для жилы, экрана и земли;

$i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота тока, рад/с;

$f$  – частота переменного тока, Гц;

$\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{э}}, \rho_{\text{з}}$  – удельное электрическое сопротивление жилы, экрана и земли, Ом·м;

$r_1$  – радиус жилы, м;

$r_2$  – внутренний радиус экрана, м;

$r_3$  – внешний радиус экрана, м;

$r_4$  – радиус кабеля, м;

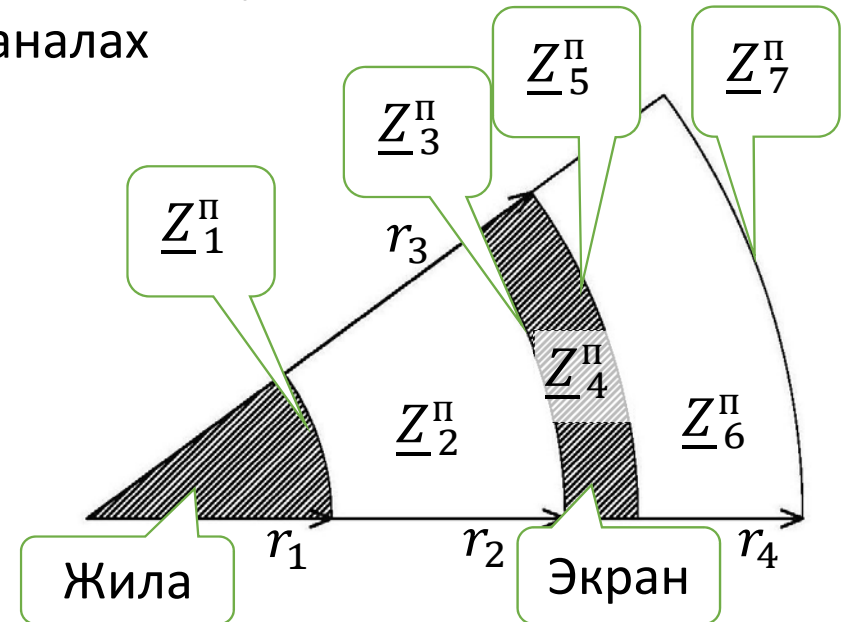
$h$  – глубина расположения кабеля, м;

$I_0(), I_1(), K_0(), K_1()$  – функции Бесселя;

$S_{ab} = \sqrt{b^2 + (h_a - h_b)^2}$  – расстояние между осями кабелей, м;

$b$  – расстояние по горизонтали между осями кабелей, м;

$h_a, h_b$  – глубина расположения фаз кабелей, м.



### 3. Условия расчета

10

- 1) КЛ 110 кВ.
- 2) Кабель АПвПг 1х300/120-64/110.
- 3) Экраны кабелей заземлены с двух сторон.
- 4) Конструкция соответствует ТУ ВУ 300528652.018-2010.

$$t_{\text{ж}} = 15..90 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{э}} = 15..80 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

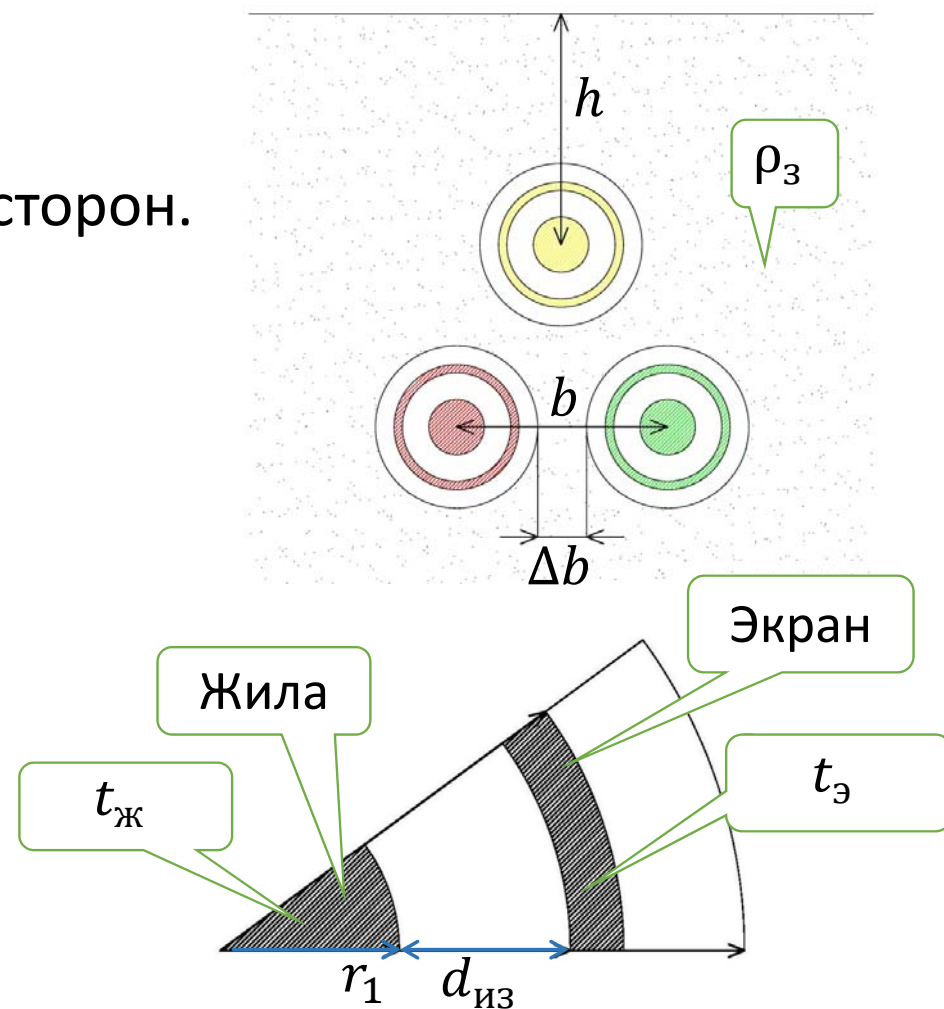
$$\rho_3 = 50..500 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$r_1 = \frac{1}{2} (19,7..21,6) \text{ мм};$$

$$d_{\text{из}} = 16,5..20,1 \text{ мм};$$

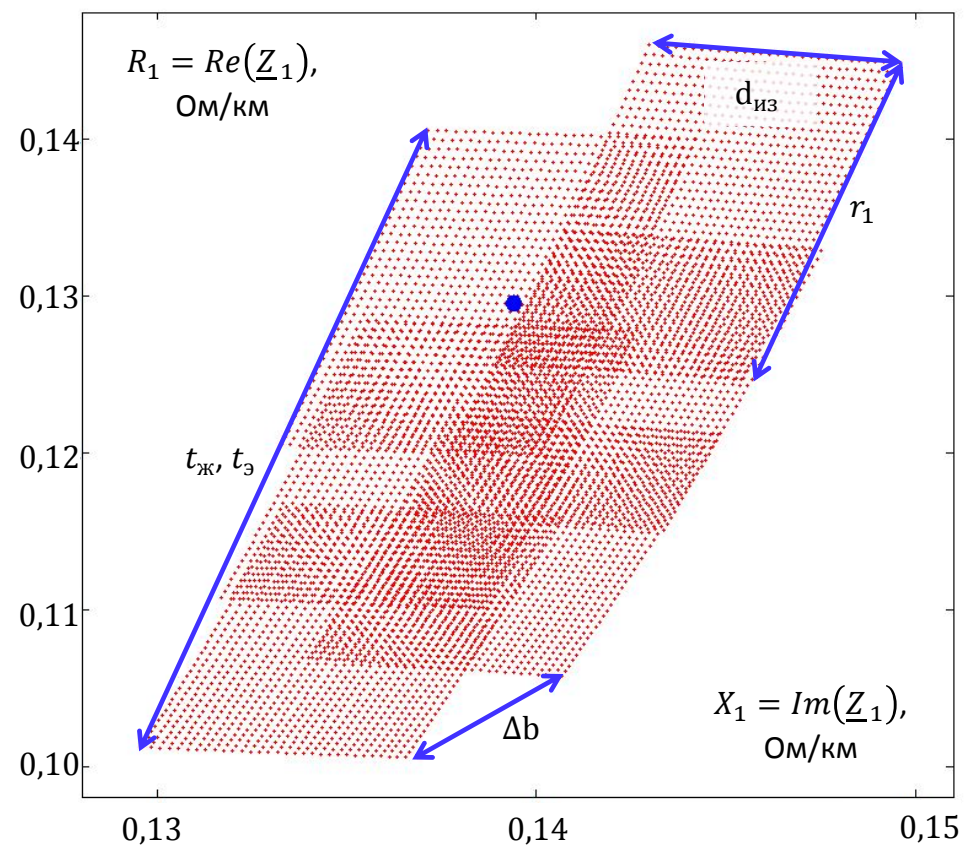
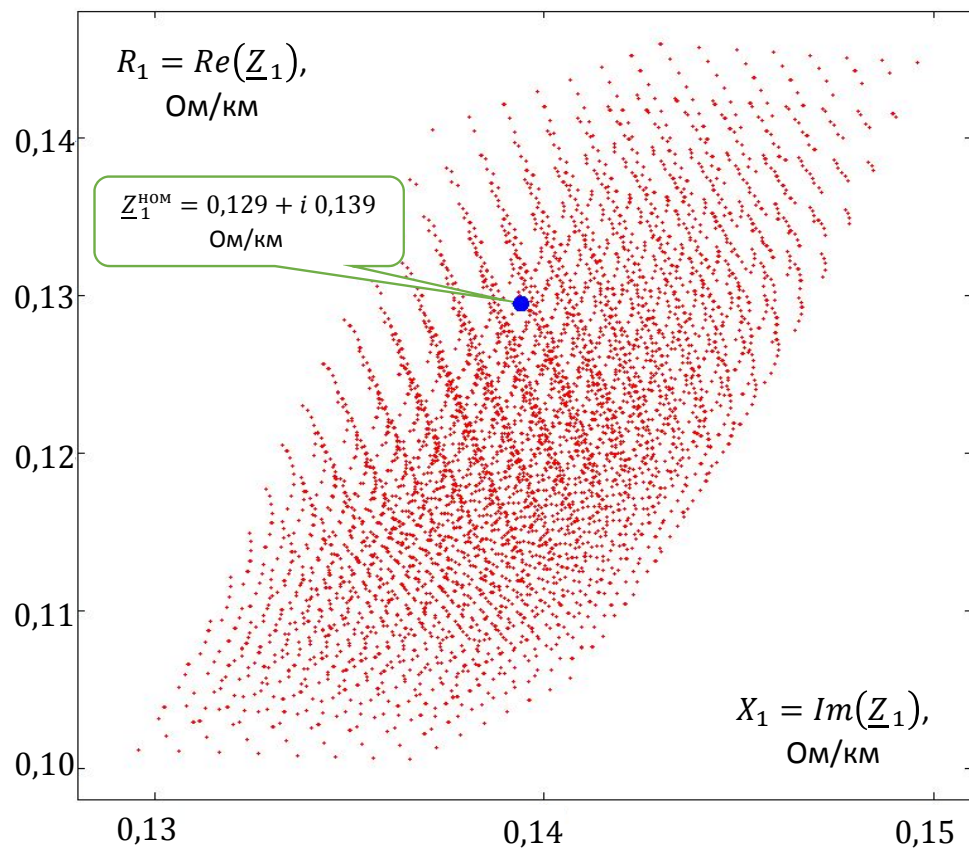
$$\Delta b = 0..10 \text{ мм};$$

$$h = 0..5 \text{ м}.$$



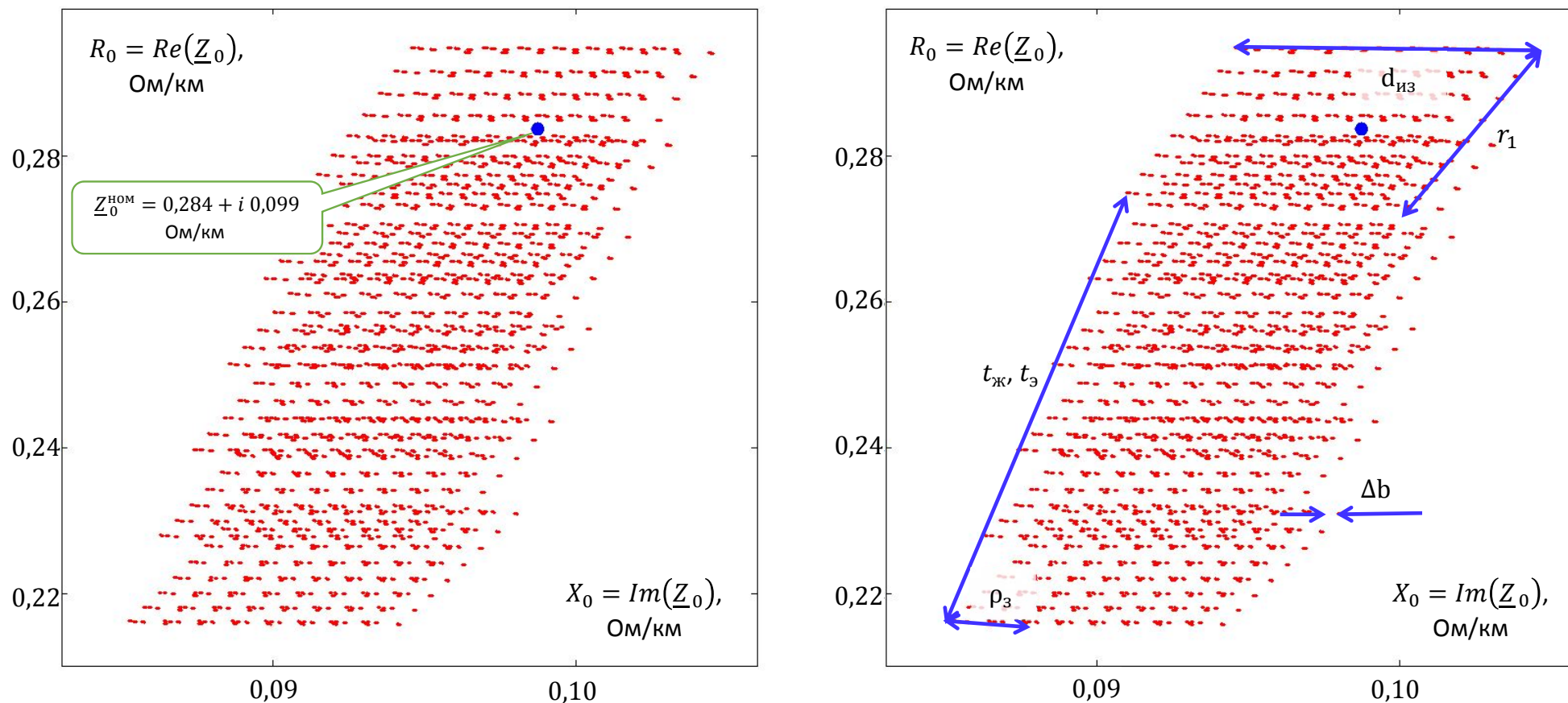
## 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ

11



Множество значений сопротивления токам прямой последовательности  $\underline{Z}_1$  кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1x300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах

# 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ

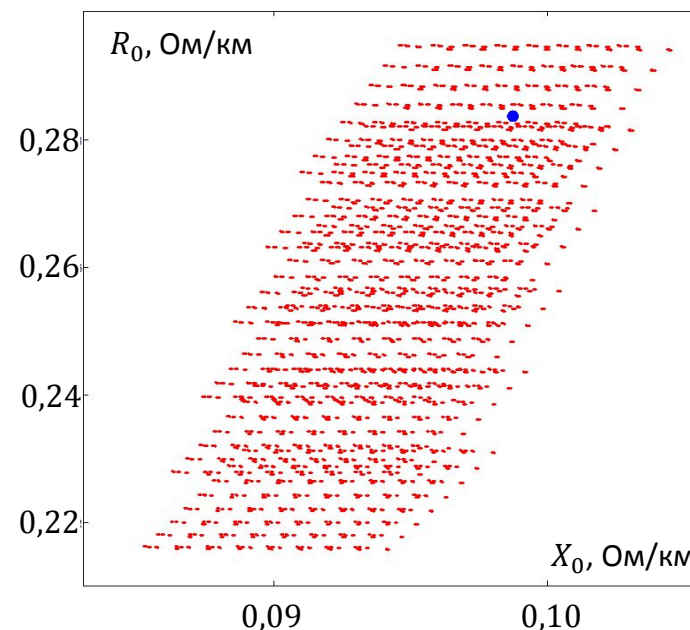
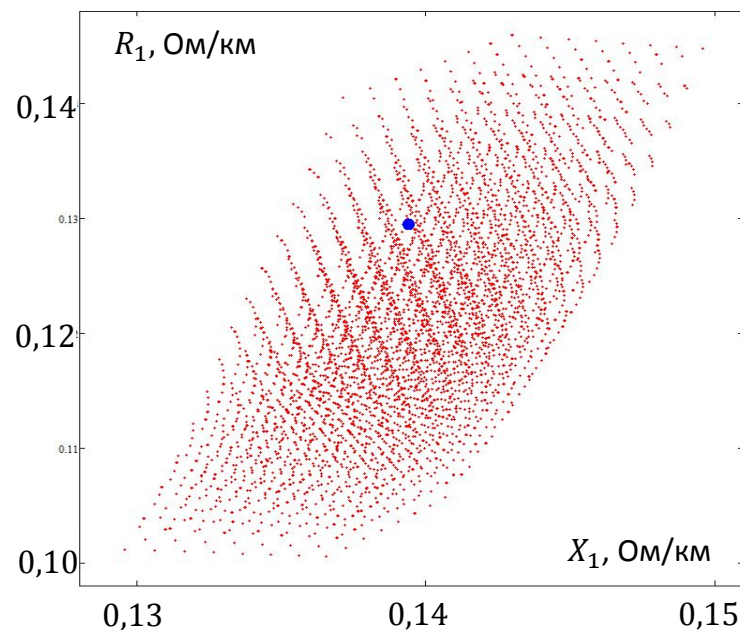


Множество значений сопротивления токам нулевой последовательности  $\underline{Z}_0$  кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1x300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах



## 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ

13



$$R_1 = 0,101..0,146 = 0,129_{-21,7\%}^{+13,2\%} \text{ Ом/км}$$

$$R_0 = 0,216..0,295 = 0,284_{-23,9\%}^{+3,9\%} \text{ Ом/км}$$

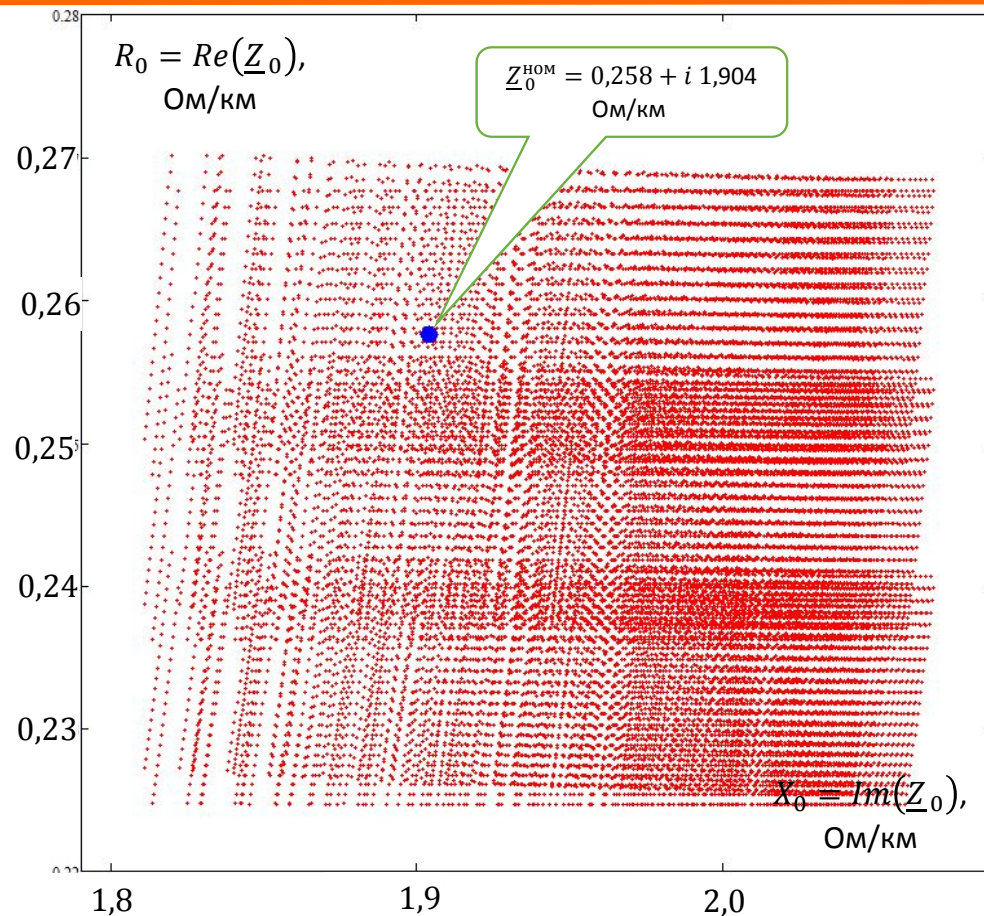
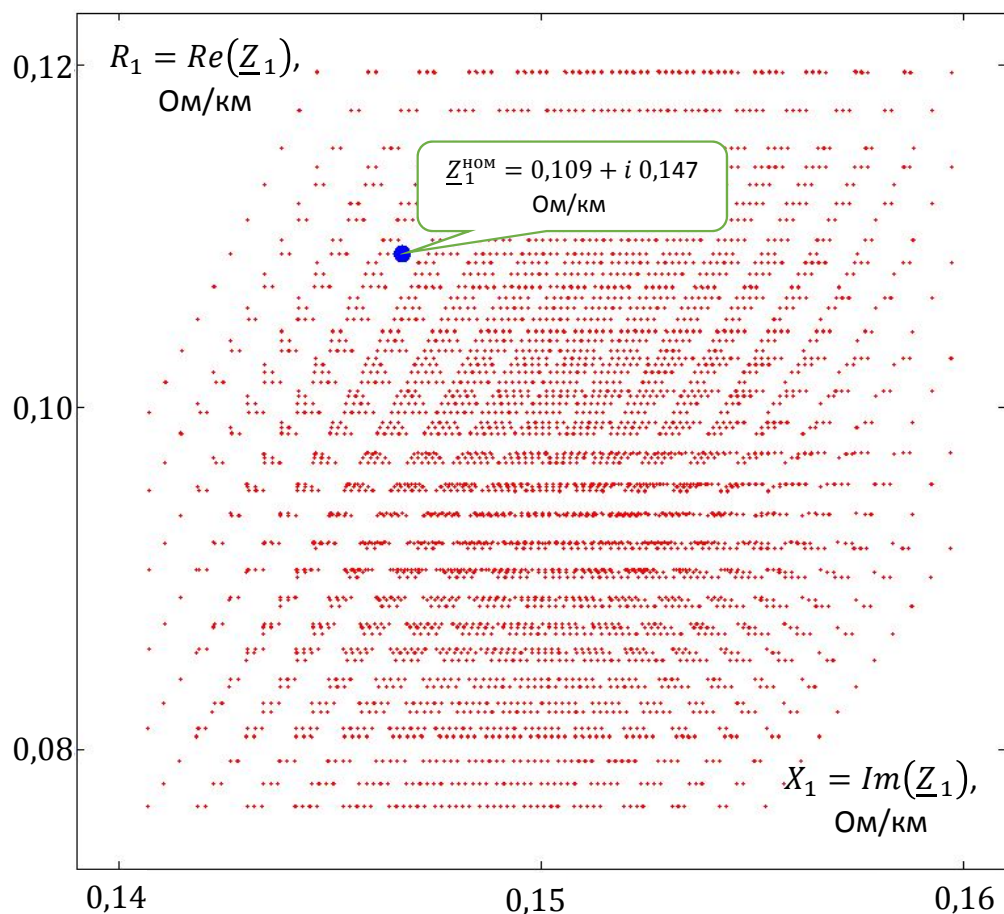
$$X_1 = 0,130..0,150 = 0,139_{-6,5\%}^{+7,9\%} \text{ Ом/км}$$

$$X_0 = 0,085..0,105 = 0,099_{-14,1\%}^{+6,1\%} \text{ Ом/км}$$

Множество значений сопротивления токам прямой  $\underline{Z}_1$  и нулевой  $\underline{Z}_0$  последовательности кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах

**Экран кабелей заземлен с двух сторон**

# 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ

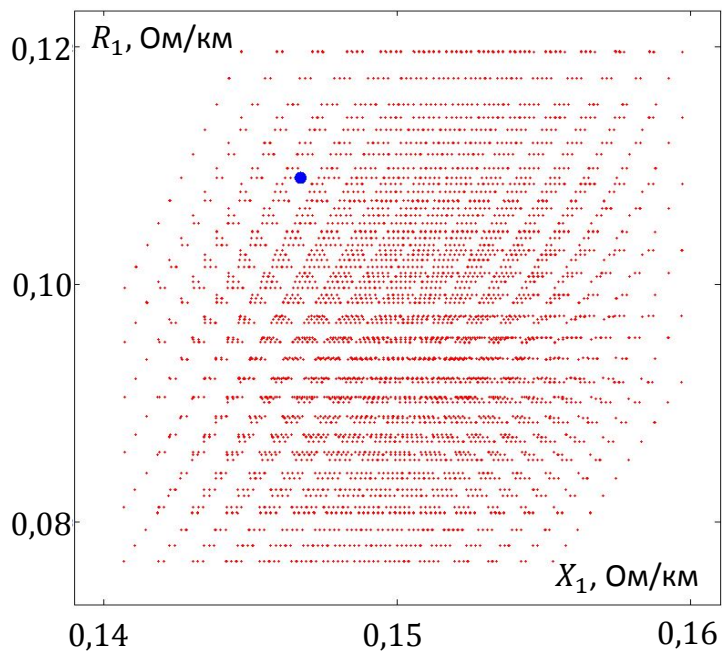


Множество значений сопротивления токам прямой  $\underline{Z}_1$  и нулевой  $\underline{Z}_0$  последовательности кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах

**Экран кабелей заземлен с одной стороны**

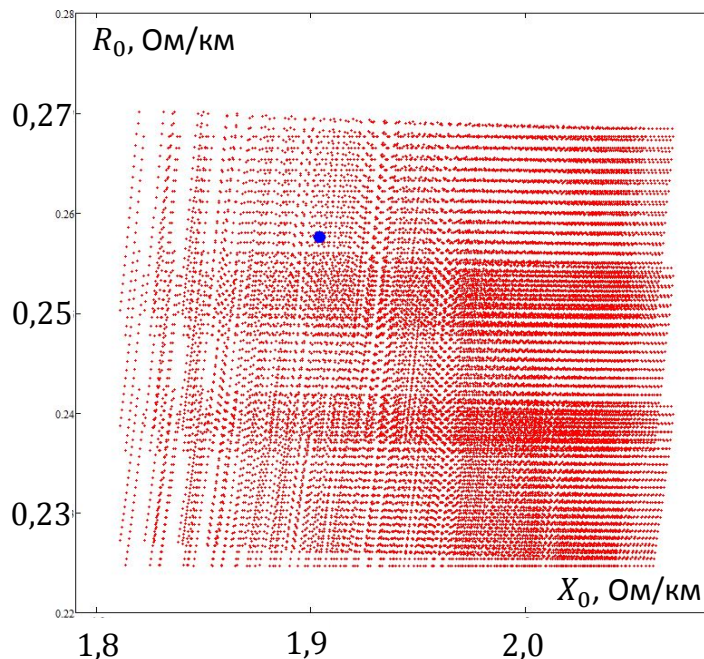


# 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ



$$R_1 = 0,077..0,120 = 0,109^{+10,1\%}_{-29,4\%} \text{ Ом/км}$$

$$X_1 = 0,141..0,160 = 0,147^{+8,8\%}_{-4,1\%} \text{ Ом/км}$$



$$R_0 = 0,225..0,270 = 0,258^{+4,7\%}_{-12,8\%} \text{ Ом/км}$$

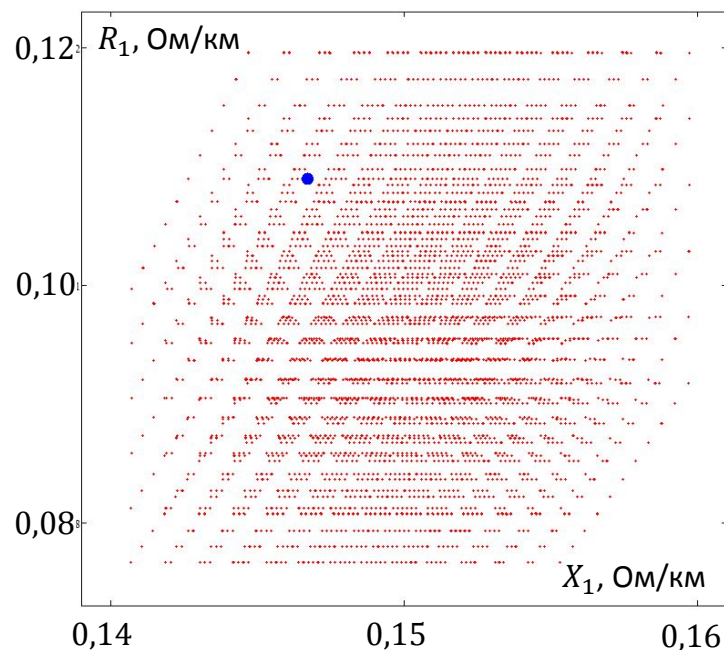
$$X_0 = 1,811..2,069 = 1,904^{+8,7\%}_{-4,9\%} \text{ Ом/км}$$

Множество значений сопротивления токам прямой  $\underline{Z}_1$  и нулевой  $\underline{Z}_0$  последовательности кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах

**Экран кабелей заземлен с одной стороны**

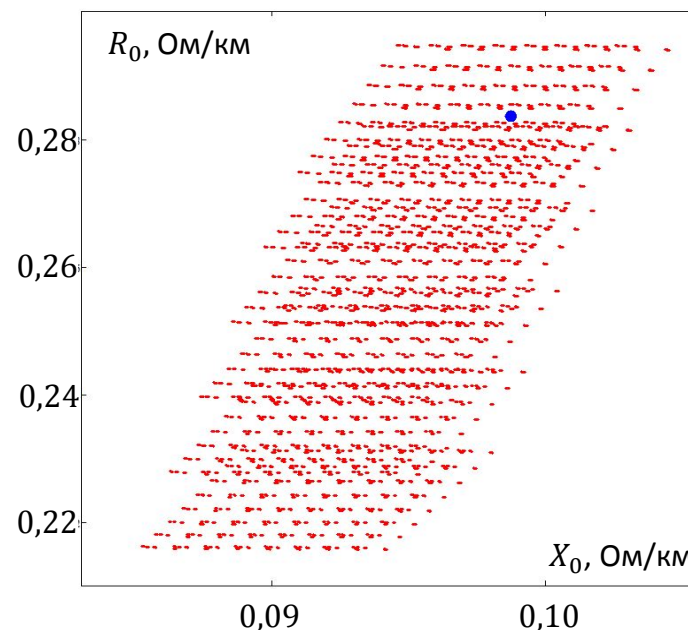
## 4. Результаты расчета сопротивлений КЛ

16



$$R_1 = 0,077..0,120 = 0,109^{+10,1\%}_{-29,4\%} \text{ Ом/км}$$

$$X_1 = 0,141..0,160 = 0,147^{+8,8\%}_{-4,1\%} \text{ Ом/км}$$



$$R_0 = 0,216..0,295 = 0,284^{+3,9\%}_{-23,9\%} \text{ Ом/км}$$

$$X_0 = 0,085..0,105 = 0,099^{+6,1\%}_{-14,1\%} \text{ Ом/км}$$

Множество значений сопротивления токам прямой  $\underline{Z}_1$  и нулевой  $\underline{Z}_0$  последовательности кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах

**Транспозиция экранов кабелей**





**besp.by**  
**Иван**  
**Иванович**  
**Дуль**

**Благодарим**  
**за внимание**

