

УДК 621.311

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Фурсанов М.И., Дуль*И.И.

Аннотация

В статье приведены наиболее точные аналитические формулы для расчета сопротивлений кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Показано, что сопротивление КЛ переменному току может меняться в диапазоне от -13% до +10% при вариации в допустимых пределах влияющих факторов (таких как: конструкция кабелей, взаимное расположение, температура). Предложен метод расчета интервалов электрических сопротивлений рассматриваемых КЛ.

Ключевые слова: сопротивление, электрическое сопротивление, кабельная линия, кабель, сшитый полиэтилен, интервал сопротивлений, интервал.

Введение

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) являются сложными электротехническими изделиями, состоящими из токопроводящих жил и различных проводящих, изолирующих и разделительных слоев, среди которых следует выделить экран, предназначенный для заземления кабеля [1]. Сложная конструкция обусловлена условиями по электрической прочности изоляции кабельных изделий, а также обеспечением их стойкости к механическим воздействиям.

С другой стороны, многослойность кабелей приводит к трудностям у специалистов при расчете их сопротивлений по переменному току. Поэтому значения сопротивлений для кабельных линий (КЛ), состоящих из кабелей с изоляцией из СПЭ, в распространенной справочной литературе [2–4] не приводятся.

В статье приведены наиболее точные аналитические формулы для расчета сопротивлений таких КЛ. Показано, что их сопротивление переменному току может меняться в диапазоне от -13% до +10% при вариации в допустимых пределах таких факторов как: конструкция кабелей, взаимное расположение кабелей, температура окружающей среды, сопротивление грунта. Для учета всех возможных вариаций предложен метод расчета интервалов электрических сопротивлений КЛ с кабелями с изоляцией из СПЭ. Предложенный метод предназначен для более качественного учета сопротивлений КЛ при анализе режимов сети и надежности энергосистем.

* РУП «Белэнергосетьпроект», Минск, Беларусь, IvanDul88@gmail.com

1. Существующие методы расчета сопротивлений КЛ

Некоторые инструкции по выбору кабелей с изоляцией из СПЭ содержат формулы для расчета индуктивного сопротивления X_1 для переменного тока прямой последовательности. Например, в [5] приведено следующее выражение:

$$X_1 = 2\pi f \cdot \left(0,05 + 0,2 \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{ср.каб}}}{r_{\text{ж}}} \right) \right) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где X_1 – индуктивное сопротивление КЛ для переменного тока прямой последовательности, Ом/км; f – частота переменного тока, Гц; $d_{\text{ср.каб}}$ – среднегеометрическое расстояние между осями кабелей, м; $r_{\text{ж}}$ – радиус токопроводящей жилы кабеля, м.

Выражение (1) не учитывает сопротивление экрана кабеля и способ его заземления. Отметим, что в [5] не приводится расчет активного сопротивления, однако численные значения включены. Кроме того, в [5] не приведены значения сопротивлений для токов нулевой последовательности.

Таким образом, формулы, аналогичные (1), могут быть применены только для первичной оценки значения индуктивного сопротивления КЛ.

В практике проектирования и эксплуатации электрических сетей наиболее значимым документом в области расчета сопротивлений элементов сети являются «Руководящие указания по релейной защите» [4].

Однако указания [4] не содержат методику для расчета сопротивлений КЛ, состоящих из кабелей с изоляцией из СПЭ. В [4] приведена методика расчета сопротивлений КЛ с маслонаполненными кабелями. Конструкция данных кабелей отличается от конструкции кабелей с изоляцией из СПЭ. Аналогичная [4] методика, но с учетом доработки и дополнения применительно к КЛ с кабелями из СПЭ приведена в [6].

Методики по расчету сопротивлений КЛ, включенные в [4] и [6], разработаны на основании теоретических выкладок, отраженных в [7]. Теоретические выкладки [7] описывают электромагнитные процессы, протекающие в воздушных линиях электропередачи с достаточной точностью, однако для КЛ в настоящее время существуют более точные расчеты.

Ниже рассматривается методика расчета сопротивлений КЛ с применением совокупных точных аналитических выражений [8, 9, 10, 11].

Матрица собственных и взаимных сопротивлений трехфазной КЛ, состоящей из кабелей с изоляцией из СПЭ может быть изображена в следующем виде:

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \ddots & \text{фаза A} & \text{экран A} & \text{фаза B} & \text{экран B} & \text{фаза C} & \text{экран C} \\ \text{фаза A} & \underline{Z}_{\text{ж}} & \underline{Z}_{\text{жэ}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{ас}} \\ \text{экран A} & \underline{Z}_{\text{жэ}} & \underline{Z}_{\text{э}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{ас}} \\ \text{фаза B} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{ж}} & \underline{Z}_{\text{жэ}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{бс}} \\ \text{экран B} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{аб}} & \underline{Z}_{\text{жэ}} & \underline{Z}_{\text{э}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{бс}} \\ \text{фаза C} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{ж}} & \underline{Z}_{\text{жэ}} \\ \text{экран C} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{ас}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{бс}} & \underline{Z}_{\text{жэ}} & \underline{Z}_{\text{э}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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.

Усредненное значение \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ac} допускается рассчитывать с использованием следующего равенства:

$$\underline{Z}_{к} = \frac{1}{3} (\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ac}). \quad (3)$$

Наглядный расчет сопротивлений $\underline{Z}_{ж}$, $\underline{Z}_{э}$, $\underline{Z}_{жэ}$, $\underline{Z}_{к}$ по упрощенным формулам можно найти в [12].

Расчетные выражения сопротивлений кабельных линий, состоящих из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, для токов нулевой и прямой последовательности (\underline{Z}_1 , \underline{Z}_0) приведены в [12]:

1) экраны кабелей заземлены с двух сторон:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= (\underline{Z}_{ж} - \underline{Z}_{к}) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} - \underline{Z}_{к})^2}{\underline{Z}_{э} - \underline{Z}_{к}}; \\ \underline{Z}_0 &= (\underline{Z}_{ж} + 2\underline{Z}_{к}) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} + 2\underline{Z}_{к})^2}{\underline{Z}_{э} + 2\underline{Z}_{к}}; \end{aligned} \quad (4)$$

2) экраны кабелей заземлены с одной стороны:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{ж} - \underline{Z}_{к}; \\ \underline{Z}_0 &= \underline{Z}_{ж} + 2\underline{Z}_{к}; \end{aligned} \quad (5)$$

3) выполнена транспозиция экранов кабелей:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{ж} - \underline{Z}_{к}; \\ \underline{Z}_0 &= (\underline{Z}_{ж} + 2\underline{Z}_{к}) - \frac{(\underline{Z}_{жэ} + 2\underline{Z}_{к})^2}{\underline{Z}_{э} + 2\underline{Z}_{к}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Равенства (4-6) являются упрощенными, однако с учетом соотношения (3), по ним с достаточной точностью можно вычислить сопротивления кабельных линий для токов нулевой и прямой последовательности (\underline{Z}_1 , \underline{Z}_0).

Наиболее точные формулы для расчета $\underline{Z}_{ж}$, $\underline{Z}_{э}$, $\underline{Z}_{жэ}$, $\underline{Z}_{к}$ приведены в работах [8, 9, 10, 11].

Согласно [8] собственное сопротивление жилы $\underline{Z}_{ж}$ формируется через такие составляющие, как:

$$\underline{Z}_{ж} = \underline{Z}_1^{\Pi} + \underline{Z}_2^{\Pi} + \underline{Z}_3^{\Pi} + \underline{Z}_5^{\Pi} + \underline{Z}_6^{\Pi} + \underline{Z}_7^{\Pi} - 2\underline{Z}_4^{\Pi}, \quad (7)$$

где \underline{Z}_1^{Π} – сопротивление внешней поверхности жилы; \underline{Z}_2^{Π} – сопротивление, обусловленное магнитным полем в изоляции кабеля между жилой и экраном; \underline{Z}_3^{Π} – сопротивление внутренней поверхности экрана; \underline{Z}_4^{Π} – взаимное сопротивление между внутренней и внешней поверхностями

экрана; \underline{Z}_5^{Π} – сопротивление внешней поверхности экрана; \underline{Z}_6^{Π} – сопротивление, обусловленное магнитным полем в оболочке кабеля; \underline{Z}_7^{Π} – сопротивление поверхности земли, окружающей кабель.

Собственное сопротивление экрана $\underline{Z}_{\text{э}}$ определяется по выражению [8]:

$$\underline{Z}_{\text{э}} = \underline{Z}_5^{\Pi} + \underline{Z}_6^{\Pi} + \underline{Z}_7^{\Pi}. \quad (8)$$

Взаимное сопротивление между жилой и экраном кабеля $\underline{Z}_{\text{жэ}}$ определяется соотношением [8]:

$$\underline{Z}_{\text{жэ}} = \underline{Z}_5^{\Pi} + \underline{Z}_6^{\Pi} + \underline{Z}_7^{\Pi} - \underline{Z}_4^{\Pi}. \quad (9)$$

Составляющие сопротивлений \underline{Z}_1^{Π} , \underline{Z}_2^{Π} , \underline{Z}_3^{Π} , \underline{Z}_4^{Π} , \underline{Z}_5^{Π} , \underline{Z}_6^{Π} , \underline{Z}_7^{Π} получены на основании теории о электро-магнитном поле и распространении электромагнитной волны в проводящем канале [8]. Сопротивления определяются следующими равенствами [8]:

$$\underline{Z}_1^{\Pi} = \frac{m_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}}{2\pi r_1} \cdot \frac{I_0(m_{\text{ж}}r_1)}{I_1(m_{\text{ж}}r_1)}; \quad (10)$$

$$\underline{Z}_2^{\Pi} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}; \quad (11)$$

$$\underline{Z}_3^{\Pi} = \frac{m_{\text{э}}\rho_{\text{э}}}{2\pi r_2} \cdot \frac{I_0(m_{\text{э}}r_2)I_1(m_{\text{э}}r_3) + K_0(m_{\text{э}}r_2)I_1(m_{\text{э}}r_3)}{I_1(m_{\text{э}}r_3)I_1(m_{\text{э}}r_2) - I_1(m_{\text{э}}r_2)K_1(m_{\text{э}}r_3)}; \quad (12)$$

$$\underline{Z}_4^{\Pi} = \frac{\rho_{\text{э}}}{2\pi r_2 r_3} \cdot \frac{1}{I_1(m_{\text{э}}r_3)I_1(m_{\text{э}}r_2) - I_1(m_{\text{э}}r_2)K_1(m_{\text{э}}r_3)}; \quad (13)$$

$$\underline{Z}_5^{\Pi} = \frac{m_{\text{э}}\rho_{\text{э}}}{2\pi r_3} \cdot \frac{I_0(m_{\text{э}}r_3)I_1(m_{\text{э}}r_2) + K_0(m_{\text{э}}r_3)I_1(m_{\text{э}}r_2)}{I_1(m_{\text{э}}r_3)I_1(m_{\text{э}}r_2) - I_1(m_{\text{э}}r_2)K_1(m_{\text{э}}r_3)}; \quad (14)$$

$$\underline{Z}_6^{\Pi} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3}; \quad (15)$$

$$\underline{Z}_7^{\Pi} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \left(-\ln \frac{1.781m_3 r_4}{2} + \frac{1}{2} - \frac{4}{3} m_3 h \right), \quad (16)$$

где $m_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_{\text{ж}}}}$, $m_{\text{э}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_{\text{э}}}}$, $m_3 = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho_3}}$ – 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; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{э}}$, ρ_3 – 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.

Схема геометрических размеров кабелей и КЛ приведена на рис. 1.

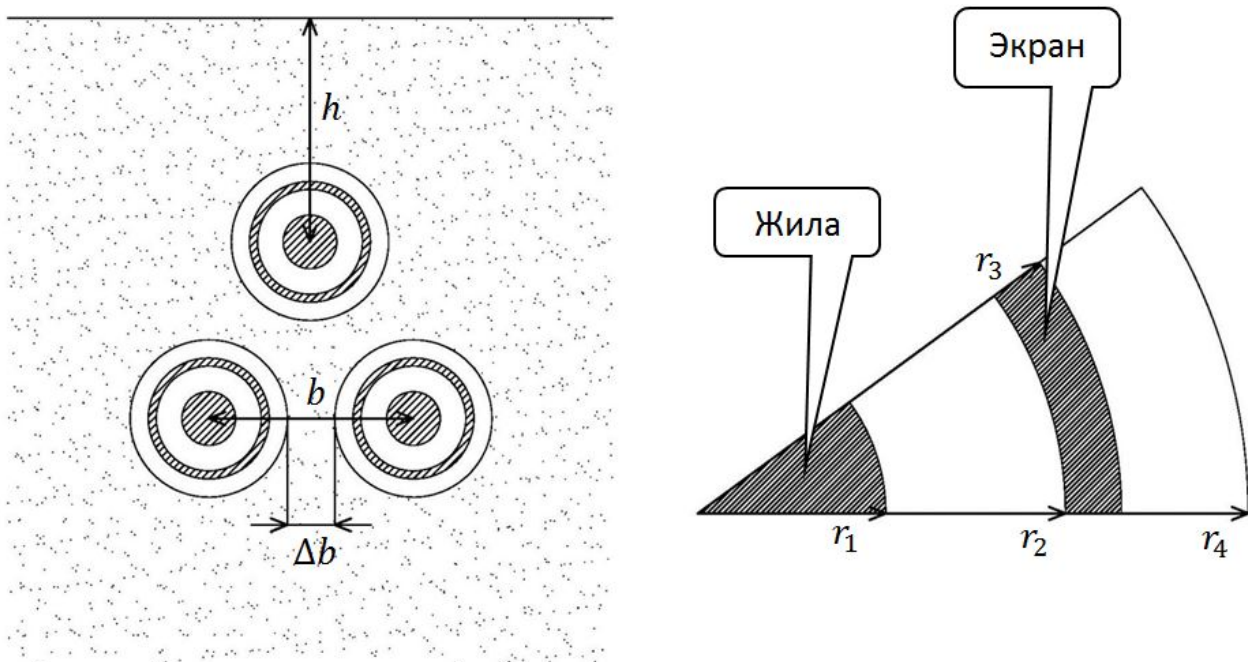


Рис. 1 – Схема расположения кабелей в трехфазной кабельной линии и структурная схема одножильных кабелей.

Взаимные сопротивления жилы одной фазы и жилы другой фазы \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ac} определяются по следующим формулам:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \left(-\ln \frac{1.781 m_z S_{ab}}{2} + \frac{1}{2} - \frac{2}{3} m_z (h_a + h_b) \right); \quad (17)$$

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

$$\underline{Z}_{ac} = \dots \text{аналогично } \dots,$$

где $S_{ab} = \sqrt{b^2 + (h_a - h_b)^2}$ – расстояние между осями кабелей, м; b – расстояние по горизонтали между осями кабелей, м; h_a , h_b – глубина расположения фаз кабелей, м.

Удельное электрическое сопротивление жилы $\rho_{ж}$ и экрана $\rho_{э}$ кабеля при рабочей температуре вычисляется по выражениям [13]:

$$\rho_{ж} = \rho_{ж.20} \cdot (1 + \alpha_{ж.20} \cdot (t_{ж} - t_{20}));$$

$$\rho_{э} = \rho_{э.20} \cdot (1 + \alpha_{экр.20} \cdot (t_{э} - t_{20})), \quad (18)$$

где $\rho_{ж.20}$, $\rho_{э.20}$ – удельное электрическое сопротивления токопроводящей жилы и экрана при температуре 20 °С; $\alpha_{ж.20}$, $\alpha_{экр.20}$ – температурные коэффициенты сопротивления материала жилы и экрана при температуре 20 °С; $t_{ж}$, $t_{э}$ – рабочие температуры жилы и экрана кабеля; $t_{20} = 20$ °С.

Значения температурных коэффициентов сопротивления жилы $\alpha_{ж.20}$ и экрана $\alpha_{экр.20}$ принимаются соответственно материалу, из которого они изготовлены:

$$\alpha_{ж.20} = \alpha_{Al.20};$$

$$\alpha_{э.20} = \alpha_{Cu.20}, \quad (19)$$

где $\alpha_{Al.20} = 4,03 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, $\alpha_{Cu.20} = 3,93 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ – температурные коэффициенты сопротивления алюминия $\alpha_{Al.20}$ и меди $\alpha_{Cu.20}$ при температуре 20 °С, согласно [13].

2. Предлагаемый метод расчета интервалов сопротивления КЛ

Анализ выражений (10-19) свидетельствует, что для промышленной частоты тока сопротивление КЛ зависит от следующих параметров:

- а) рабочей температуры жилы $t_{ж}$ и экрана $t_{э}$ кабеля;
- б) удельного электрического сопротивления земли ρ_3 ;
- в) радиуса жилы r_1 ;
- г) внутреннего и внешнего радиуса экрана r_2 и r_3 ;
- д) радиуса кабеля r_4 ;
- е) расстояния по горизонтали между осями кабелей b ;
- ж) глубины расположения кабелей h .

Проиллюстрируем данную зависимость на примере трехфазной кабельной линии 110 кВ, выполненной кабелем АПвПг 1х300/120-64/110. В рассматриваемой трехфазной линии кабели расположены треугольником вплотную. В рассматриваемом примере экраны кабелей заземлены с двух сторон. Вариация размеров структурных элементов кабеля соответствует ТУ ВУ 300528652.018-2010 [14].

Расчет выполнен для кабеля со следующими интервалами значений параметров:

$$\begin{aligned} t_{ж} &= 15..90 \text{ }^\circ\text{C}; & r_1 &= \frac{1}{2} (19,7..21,6) \text{ мм}; \\ t_{э} &= 15..80 \text{ }^\circ\text{C}; & d_{из} &= 16,5..20,1 \text{ мм}; \\ \rho_3 &= 50..500 \text{ Ом} \cdot \text{м}; & \Delta b &= 0..10 \text{ мм}, \\ h &= 0..5 \text{ м}; \end{aligned} \quad (20)$$

где $t_{ж} = t_{ж.min}..t_{ж.max} = 15..90 \text{ }^\circ\text{C}$ – записью подобного формата обозначен непрерывный интервал значений; $d_{из}$ – суммарная толщина слоев между жилой и экраном с учетом изоляции; $\Delta b = b - 2r_4$ – расстояние по горизонтали между кабелями в свету.

Расчет выполнен при согласованном изменении рабочей температуры жилы $t_{ж}$ и экрана $t_{э}$ кабеля.

Внутренний r_2 и внешний r_3 радиусы экрана, а также радиус кабеля r_4 и расстояние по горизонтали между осями кабелей рассчитаны по следующей модели:

$$\begin{aligned} r_2(r_1, d_{из}) &= r_1 + d_{из}; \\ r_3(r_1, d_{из}) &= r_2(r_1, d_{из}) + d_э; \\ r_4(r_1, d_{из}) &= r_3(r_1, d_{из}) + d_{об}; \\ b(r_1, d_{из}, \Delta b) &= \Delta b + 2r_4(r_1, d_{из}), \end{aligned} \quad (21)$$

где $d_э = 2 \text{ мм}$ – диаметр проволок экрана; $d_{об} = 3,5 \text{ мм}$ – суммарная толщина слоев между экраном и внешним радиусом кабеля с учетом оболочки.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов. На данном рисунке отражено множество значений сопротивления токам прямой последовательности \underline{Z}_1 рассматриваемой КЛ при вариации указанных в формуле (20) параметров, по вертикали отложено активное сопротивление $R_1 = Re(\underline{Z}_1)$, а по горизонтали реактивное $X_1 = Re(\underline{Z}_1)$ сопротивление для каждой расчетной точки сопротивления \underline{Z}_1 .

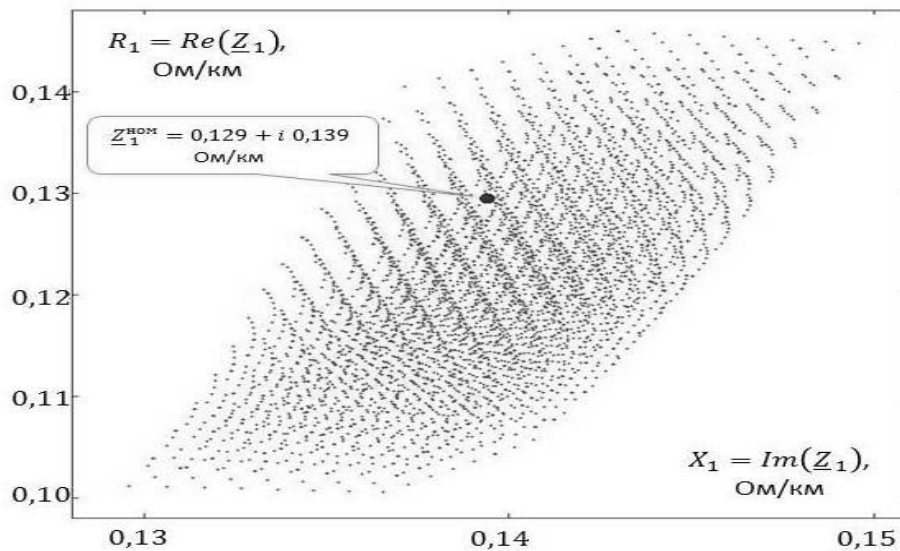


Рис. 2 – Множество значений сопротивления токам прямой последовательности \underline{Z}_1 кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах (выражение (20)).

На рис. 2 жирной точкой обозначено сопротивление КЛ, вычисленное по номинальным параметрам.

Анализ результатов расчета показал, что для рассматриваемой линии при вариации параметров согласно формуле (20) интервал для сопротивления \underline{Z}_1 составит:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= (0,101..0,146) + i(0,130..0,150) \text{ Ом/км}; \\ \underline{Z}_1 &= \left(0,129 \pm \frac{11,3\%}{21,7\%}\right) + i\left(0,139 \pm \frac{7,9\%}{6,5\%}\right) \text{ Ом/км.} \end{aligned} \quad (22)$$

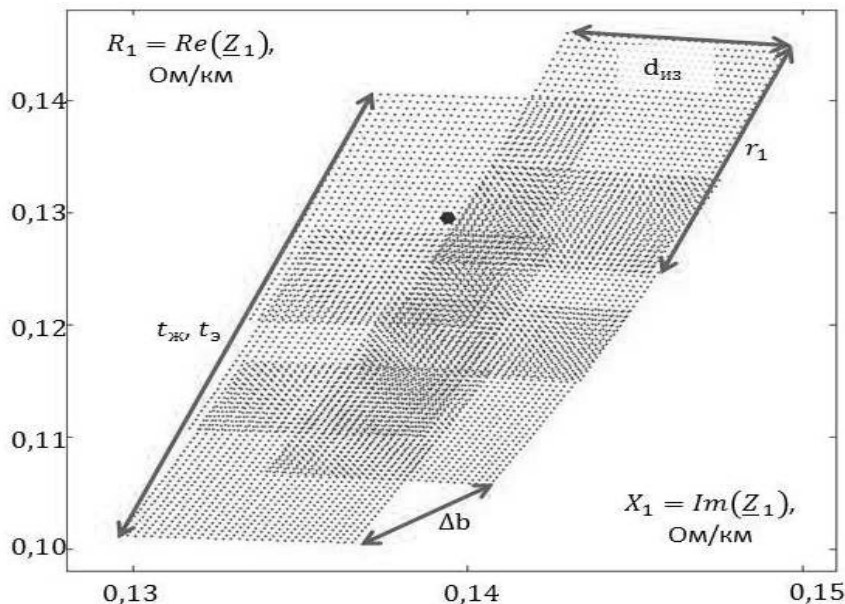


Рис. 3 – Множество значений сопротивления токам прямой последовательности \underline{Z}_1 кабельной линии, состоящей из кабеля АПвПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах (выражение (20)). Изменено количество расчетных точек для иллюстрации зависимости от параметров.

На рисунке 3 приведено множество значений аналогичное предыдущему, однако, для иллюстрации зависимости значений \underline{Z}_1 от параметров, изменен шаг вариации.

Как иллюстрирует рисунок 3, сопротивление рассматриваемой КЛ токам прямой последовательности зависит от таких параметров как: рабочая температуры жилы $t_{ж}$ и экрана $t_{э}$ кабеля; радиус жилы r_1 ; суммарная толщина слоев между жилой и экраном с учетом изоляции $d_{из}$; расстояние между кабелями в свету Δb .

Анализ множества значений на рисунках 2 и 3 показывает, что для исследуемой кабельной линии интервал значений сопротивления \underline{Z}_1 при внешнем оценивании границ может быть найден при выполнении расчета со следующими граничными значениями параметров:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1^{max} &= Re\left(\underline{Z}_1(t_{ж}^{max}, t_{э}^{max}, r_1^{min}, d_{из}^{min}, \Delta b^{max})\right) + \\ &+ i Im\left(\underline{Z}_1(t_{ж}^{max}, t_{э}^{max}, r_1^{min}, d_{из}^{max}, \Delta b^{max})\right); \\ \underline{Z}_1^{min} &= Re\left(\underline{Z}_1(t_{ж}^{min}, t_{э}^{min}, r_1^{max}, d_{из}^{max}, \Delta b^{min})\right) + \\ &+ i Im\left(\underline{Z}_1(t_{ж}^{min}, t_{э}^{min}, r_1^{max}, d_{из}^{min}, \Delta b^{min})\right). \end{aligned} \quad (23)$$

На рисунке 4 приведено множество значений сопротивления токам нулевой последовательности \underline{Z}_0 рассматриваемой КЛ при вариации указанных в формуле (20) параметров.

Сопротивление рассматриваемой КЛ токам нулевой последовательности \underline{Z}_0 зависит от всех параметров указанных в (20). Однако следует отметить, что в меньшей степени сопротивление \underline{Z}_0 зависит от удельного электрического сопротивления земли ρ_3 и от глубины расположения кабелей h , что обусловлено схемой заземления экранов кабелей в рассматриваемом примере.

Также следует отметить, что границы интервала значений сопротивления \underline{Z}_0 могут быть определены при выполнении расчетов с граничными значениями параметров, аналогично (23).

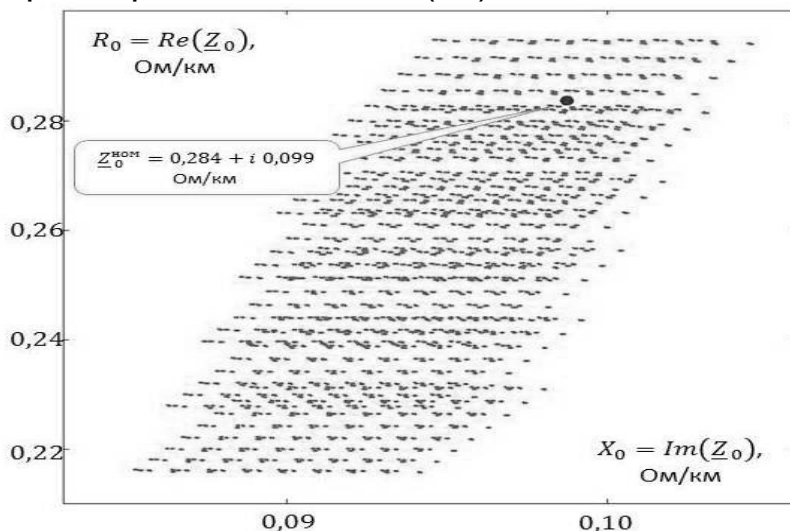


Рис. 4 – Множество значений сопротивления токам нулевой последовательности \underline{Z}_0 кабельной линии, состоящей из кабеля АПВПг 1х300/120-64/110 при вариации параметров в допустимых пределах (выражение (20)).

Заключение

1) Современные кабели с изоляцией из СПЭ являются сложными электротехническими изделиями, что создает трудности при расчете сопротивлений КЛ, состоящих из таких кабелей.

2) В статье приведены наиболее точные аналитические формулы для расчета сопротивлений КЛ из кабелей с изоляцией из СПЭ. В ходе рассмотрения обсуждаются результаты анализа зависимости сопротивления КЛ, состоящей из кабелей с изоляцией из СПЭ, от вариации параметров в пределах допустимых стандартами.

3) Предложен метод расчета интервалов сопротивления КЛ, состоящих из кабелей с изоляцией из СПЭ. Рассчитанный по предлагаемому методу интервал значений сопротивлений учитывает вариацию всех влияющих параметров. Метод предназначен для более полного учета сопротивлений кабельных линий при анализе режимов сети и надежности энергосистем.

Литература

1. Короткевич М.А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть: учеб. пособие Минск: Выш. шк., 2010, 574 с.

2. Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012, 376 с.

3. Герасименко А.А. Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. Ростов н.-Д.: Феникс, 2008, 715 с.

4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979, 152 с.

5. Инструкция по выбору, эксплуатации и техническому обслуживанию кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6–35 кВ: ООО «Таткабель», 2014, 61 с.

6. Фурсанов М.И., Дуль И.И. Определение сопротивлений кабельных линий, состоящих из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 // Энергетическая стратегия, 2018, №2, с. 49-52.

7. Вагнер К.Ф. Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей. учеб. пособие / пер. с англ. Л.Е. и М.Е. Сыркиных; под ред. Д.А. Городского М: ОНТИ НКТП СССР, 1936, 407 с.

8. Костенко М.В. [и др.] Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Л: Наука, 1988, 302 с.

9. Бикфорд Дж.П., Мюлине Н., Рид Дж.Р. Основы теории перенапряжений в электрических сетях. М: Энергоиздат, 1981, 165 с.

10. Watson N. Arrillaga J. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007, 421 p.

11. EMTP Theory book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, United States of America (www.emtp.org).

12. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2010, 155 с.

13. ГОСТ Р 60287-1-1-2009 (МЭК 60287-1-1:2006) «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1».

14. ТУ ВУ 300528652.018-2010 «Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ».