

Лекция №6 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Цель: Показать связь параметров системы и параметров установившегося режима при однофазного замыкании на землю при прямой и обратной их связи.

Список литературы обязательной :

42) Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов – 5-е изд., перераб., - М.: Энергоатомиздат, 1989 – 528 с.: ил.

Список литературы дополнительной:

46) 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. ил.

47) Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.: ил.

План лекции:

1. Схемы замещения сети с изолированной нейтралью прямой обратной и нулевой последовательностей при одофазном замыкании на землю.

2. Запись законов Кирхгофа и граничных условий согласно методу симметричных составляющих при одофазном замыкании на землю.

3. Представление токов всех последовательностей как функций параметров системы при одофазном замыкании на землю.

4. Обратная задача: нахождение параметров системы по замеренным параметрам режима при одофазном замыкании на землю.

В данной лекции моделируется установившийся режим при

однофазном замыкании на землю через статическое переходное сопротивление и рассматриваются зависимости симметричных составляющих напряжения и тока от параметров контура протекания аварийного тока при однофазном замыкании на землю. На основе данных зависимостей, при известности значений симметричных составляющих токов и напряжений, можно определить параметры контура протекания аварийного тока, такие как величина переходного сопротивления места замыкания на землю и значение суммарной емкости шин подстанции относительно земли.

На рис.3.1, 3.2, 3.3, 3.4 представлены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей одноцепной воздушной линии электропередач без грозотроса с нагрузкой для фазы А с учетом того, что ОЗЗ произошло на этой фазе через переходное сопротивление $R_{\text{п}}$.

В схеме замещения нулевой последовательности емкость C_1 учитывается как утроенная величина. Это связано с тем, что схема замещения нулевой последовательности составляется с учетом закорачивания ЭДС источников [42], и, следовательно, емкости оказываются параллельно соединенными. Пользуясь правилом эквивалентирования параллельно соединенных емкостей, получаем величину утроенной емкости. Так же следует отметить, что в схеме нулевой последовательности не учитывается сопротивление нагрузки нулевой последовательности, так как отсутствует путь протекания тока нулевой последовательности из-за схем соединения обмоток понижающих трансформаторов («звезда» с изолированной нейтралью, «треугольник»).

Согласно [46] сопротивление обратной последовательности трехфазной одноцепной линии равно сопротивлению прямой последовательности. Примем допущение, что в состав рассматриваемой обобщенной нагрузки в нашем случае не входят двигатели, поэтому сопротивления прямой и обратной последовательностей обобщенной нагрузки равны между собой. Под сопротивлением источника прямой и обратной последовательностей

понимается сопротивление питающего трансформатора.

С целью моделирования зависимости фазных напряжений и токов от переходного сопротивления в месте ОЗЗ рассмотрим систему уравнений, составленную согласно рис.3.1, 3.2, 3.3, 3.4.

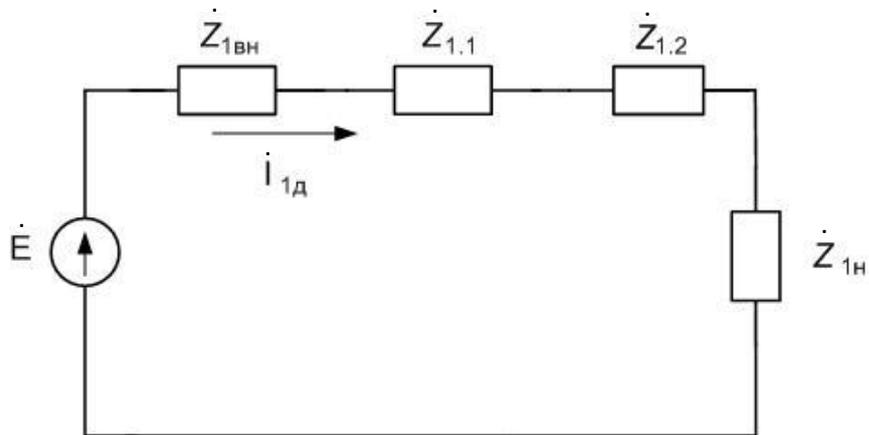


Рис.3.1. Схема замещения прямой последовательности в до аварийном режиме

- $\dot{Z}_{1вн}$ – внутреннее сопротивление источника,
- $\dot{Z}_{1,1}$ – сопротивление ЛЭП прямой последовательности до места ОЗЗ,
- $\dot{Z}_{1,2}$ – сопротивление ЛЭП прямой последовательности после места ОЗЗ,
- $\dot{Z}_{1н}$ – сопротивление нагрузки прямой последовательности

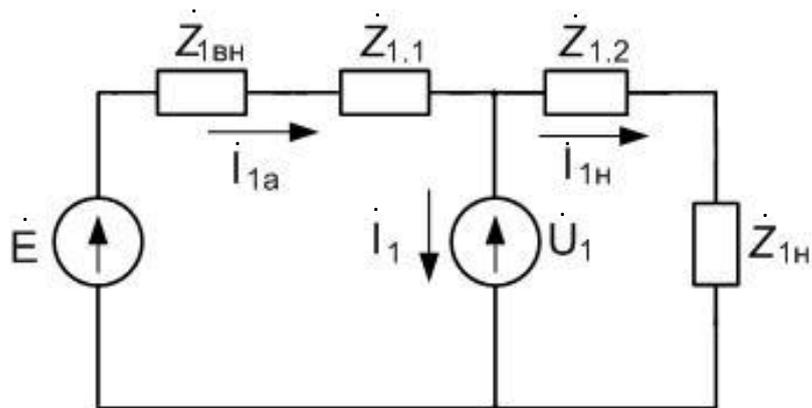


Рис.3.2. Схема замещения прямой последовательности в аварийном режиме.

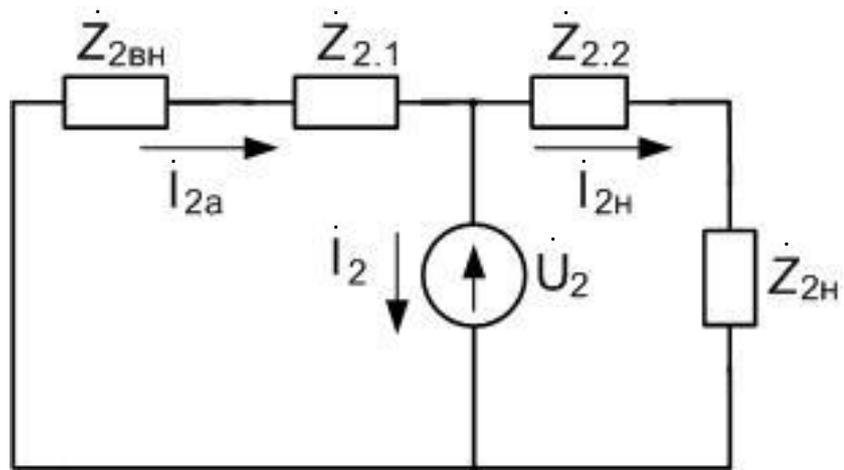


Рис.3.3. Схема замещения обратной последовательности в аварийном режиме.

- $\dot{Z}_{2вн}$ – внутреннее сопротивление источника,
- $\dot{Z}_{2.1}$ – сопротивление ЛЭП прямой последовательности до места ОЗЗ,
- $\dot{Z}_{2.2}$ – сопротивление ЛЭП прямой последовательности после места ОЗЗ,
- $\dot{Z}_{2н}$ – сопротивление нагрузки прямой последовательности

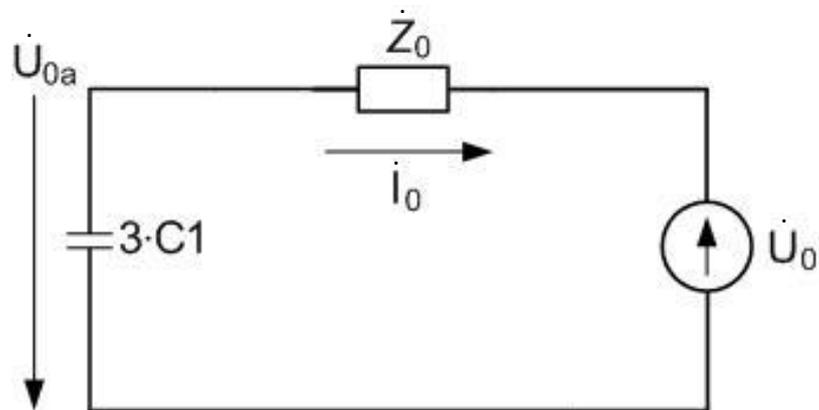


Рис.3.4. Схема замещения нулевой последовательности в аварийном режиме.

$$\left\{ \begin{array}{l}
Ee^{j(\omega t + \varphi)} = \dot{I}_{1a} \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) + \dot{I}_{1H} \cdot (\dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H}) \\
\dot{U}_1 = Ee^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_{1a} \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) \\
\dot{U}_2 = -\dot{I}_{2a} \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}) \\
\dot{U}_2 = \dot{I}_{2H} \cdot (\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H}) \\
\dot{U}_0 = -\dot{I}_0 \cdot \left(\frac{1}{j\omega C_1 \cdot 3} + \dot{Z}_0 \right) \\
\dot{I}_{1a} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{1H} \\
\dot{I}_{2a} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{2H} \\
\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = R_n \cdot (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0) \\
\dot{U}_{1a} = Ee^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1BH} \\
\dot{U}_{2a} = -\dot{I}_{2a} \cdot \dot{Z}_{2BH} \\
\dot{U}_{0a} = \frac{-1}{j\omega C_1 \cdot 3} \cdot \dot{I}_0 \\
\dot{U}_A = \dot{U}_{1a} + \dot{U}_{2a} + \dot{U}_{0a} \\
\dot{U}_B = \dot{U}_{1a} \cdot \dot{a}^2 + \dot{U}_{2a} \cdot \dot{a} + \dot{U}_0 \\
\dot{U}_C = \dot{U}_{1a} \cdot \dot{a} + \dot{U}_{2a} \cdot \dot{a}^2 + \dot{U}_0
\end{array} \right. \quad (3.1)$$

Зная, что в неповрежденных фазах отсутствует аварийная ветка, запишем следующие выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{a}^2 \cdot \dot{I}_1 + \dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0 \\
\dot{a} \cdot \dot{I}_1 + \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0
\end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{I}_1 = -\frac{\dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0}{\dot{a}^2} \\
-\frac{\dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0}{\dot{a}} + \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0
\end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{I}_1 = -\frac{\dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0}{\dot{a}^2} \\
-(\dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0) + \dot{a}^3 \cdot \dot{I}_2 + \dot{a} \cdot \dot{I}_0 = 0
\end{array} \right. \quad (3.2)$$

Зная, что $\dot{a}^3 = e^{(j \cdot \frac{2\pi}{3}) \cdot 3} = e^{j \cdot 2\pi} = 1$ и $1 + \dot{a} = -\dot{a}^2$, упростим второе уравнение системы уравнений (3.2).

$$-(\dot{a} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0) + \dot{a}^3 \cdot \dot{I}_2 + \dot{a} \cdot \dot{I}_0 = 0$$

$$-a \cdot \dot{I}_2 - \dot{I}_0 + \dot{I}_2 + a \cdot \dot{I}_0 = 0$$

$$-a \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0 - a \cdot \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_0 = \dot{I}_1$$

Выразим \dot{I}_{1H} из первого и шестого уравнений системы уравнений (3.1):

$$E e^{j(\omega t + \varphi)} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_{1H}) \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) + \dot{I}_{1H} \cdot (\dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H})$$

$$E e^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_1 \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) = \dot{I}_{1H} \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH} + \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H})$$

$$\dot{I}_{1H} = \frac{E e^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_1 \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH})}{\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH} + \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H}} \quad (3.3)$$

Выразим \dot{I}_{2H} из третьего, четвертого и шестого уравнений системы уравнений (3.1):

$$-(\dot{I}_2 + \dot{I}_{2H}) \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}) = \dot{I}_{2H} \cdot (\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H})$$

$$-\dot{I}_2 \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}) = \dot{I}_{2H} \cdot (\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H} + \dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH})$$

$$\dot{I}_{2H} = \frac{-\dot{I}_2 \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH})}{\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H} + \dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}} \quad (3.4)$$

Зная, что $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0$ подставим значения $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ в восьмое уравнение системы уравнений (3.1):

$$E e^{j(\omega t + \varphi)} - (\dot{I}_0 + \dot{I}_{1H}) \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) - (\dot{I}_0 + \dot{I}_{2H}) \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}) - \dot{I}_0 \cdot \left(\frac{1}{j\omega 3C_1} + \dot{Z}_0 \right) = 3\dot{I}_0 \cdot R_{\Pi}$$

$$E e^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_{1H} \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) - \dot{I}_{2H} \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}) + \dot{I}_0 \left(-\dot{Z}_{2.1} - \dot{Z}_{2BH} - \frac{1}{j\omega 3C_1} - \dot{Z}_0 - \dot{Z}_{1.1} - \dot{Z}_{1BH} \right) = 3\dot{I}_0 R_{\Pi} \quad (3.5)$$

Подставим \dot{I}_{1H} и \dot{I}_{2H} из уравнений (3.3, 3.4) в уравнение (3.5):

$$E e^{j(\omega t + \varphi)} - \frac{\left(E e^{j(\omega t + \varphi)} - \dot{I}_0 \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}) \right) \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH})}{\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH} + \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H}} - \frac{\dot{I}_0 \cdot (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH})^2}{\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H} + \dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH}} + \dot{I}_0 \cdot \left(-\dot{Z}_{2.1} - \dot{Z}_{2BH} - \frac{1}{j\omega 3C_1} - \dot{Z}_0 - \dot{Z}_{1.1} - \dot{Z}_{1BH} \right) = 3\dot{I}_0 R_{\Pi}$$

или

$$\dot{I}_0 = \frac{E \cdot \dot{\gamma} \cdot (\dot{\beta} - \dot{k})}{3R_{\Pi} \dot{\beta} \dot{\gamma} - \dot{\gamma} \dot{k}^2 + \dot{\beta} (\dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH})^2 - \dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{\gamma}},$$

где

$$\dot{\alpha} = -\dot{Z}_{2.1} - \dot{Z}_{2BH} - \frac{1}{j\omega 3C_1} - \dot{Z}_0 - \dot{Z}_{1.1} - \dot{Z}_{1BH},$$

$$\dot{\beta} = \dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH} + \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1H},$$

$$\dot{\gamma} = \dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2H} + \dot{Z}_{2.1} + \dot{Z}_{2BH},$$

$$\dot{k} = \dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1BH}.$$

Далее рассмотрим алгоритм определения параметров системы, который используется при решении задачи нахождения величин переходного сопротивления в месте ОЗЗ и емкости фазы ЛЭП по замеренным значениям фазных напряжений и токов в начале ЛЭП. Для этого в схеме на рис.3.1, 3.2 заменим источник ЭДС с внутренним сопротивлением напряжением $\dot{U}_{1д}$ и $\dot{U}_{1а}$ соответственно, в схеме на рис.3.3 заменим сопротивление источника обратной последовательности напряжением обратной последовательности $\dot{U}_{2а}$.

Следует отметить, что на ЛЭП 6-10 кВ используются измерительный трансформатор тока нулевой последовательности и измерительные трансформаторы тока, установленные в двух фазах (фазы А и С), поэтому токи прямой и обратной последовательностей будут вычисляться через токи в фазах А и С и ток нулевой последовательности.

Рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{1д} = \dot{I}_{1д} \cdot (\dot{Z}_{1.1} + \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1н}) \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{1а} + \dot{I}_{2а} + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_A = \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_{1а} + \dot{a} \cdot \dot{I}_{2а} + \dot{I}_0 \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_{1н} \cdot (\dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1н}) \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_{2н} \cdot (\dot{Z}_{2.2} + \dot{Z}_{2н}) \\ \dot{U}_{1а} = \dot{I}_{1а} \cdot \dot{Z}_{1.1} + \dot{U}_1 \\ \dot{U}_{2а} = \dot{I}_{2а} \cdot \dot{Z}_{2.1} + \dot{U}_2 \\ \dot{U}_{0а} = \dot{I}_{0а} \cdot \dot{Z}_0 + \dot{U}_0 \\ \dot{I}_{1а} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{1н} \\ \dot{I}_{2а} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{2н} \\ \dot{U}_{\text{в месте 033}} = R_{\Pi} \cdot \dot{I}_{\text{в месте 033}} \\ \dot{U}_{0а} = -\dot{I}_0 \cdot \frac{1}{3 \cdot j\omega C_1} \end{array} \right. ,$$

где $\dot{a} = e^{j \frac{2 \cdot \pi}{3}}$,

$$\dot{U}_{\text{в месте 033}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0,$$

$$\dot{I}_{\text{в месте 033}} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = R_{\Pi} \cdot (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0) \\
\frac{\dot{U}_{0a}}{\dot{I}_0} = \frac{-1}{3 \cdot j\omega C_1} \\
\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} = \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1Н} \\
\dot{U}_1 = \dot{I}_{1Н} \cdot \left(\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} \right) \\
\dot{U}_2 = \dot{I}_{2Н} \cdot \left(\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} \right) \\
\dot{I}_{1Н} = \dot{I}_{1a} - \dot{I}_1 \\
\dot{I}_{2Н} = \dot{I}_{2a} - \dot{I}_2 \\
\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1} \\
\dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} - \dot{I}_{2a} \cdot \dot{Z}_{2.1} \\
\dot{U}_0 = \dot{U}_{0a} - \dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_0 \\
\dot{I}_{2a} = \dot{I}_C - \dot{I}_{1a} - \dot{I}_0 \\
\dot{I}_A = \dot{a} \cdot (\dot{I}_C - \dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) + \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_{1a} + \dot{I}_0
\end{array} \right. \quad (3.6)$$

Зная, что $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0$, в уравнениях системы уравнений (3.6) токи прямой, обратной последовательности можно заменить током нулевой последовательности.

$$\left\{ \begin{array}{l}
R_{\Pi} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0}{3 \cdot \dot{I}_0} \\
\frac{-\dot{I}_0}{3 \cdot j\omega \cdot \dot{U}_{0a}} = C_1 \\
\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} = \dot{Z}_{1.2} + \dot{Z}_{1Н} \\
(\dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1}) = (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) \cdot \left(\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} \right) \\
\dot{U}_2 = (\dot{I}_{2a} - \dot{I}_0) \cdot \left(\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} \right) \\
\dot{I}_{1Н} = \dot{I}_{1a} - \dot{I}_0 \\
\dot{I}_{2Н} = \dot{I}_{2a} - \dot{I}_0 \\
\dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1} \\
\dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} - \dot{I}_{2a} \cdot \dot{Z}_{1.1} \\
\dot{U}_0 = \dot{U}_{0a} - \dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_0 \\
\dot{I}_{2a} = \dot{I}_C - \dot{I}_{1a} - \dot{I}_0 \\
\dot{I}_{1a} = \frac{\dot{I}_A - \dot{a} \cdot \dot{I}_C - \dot{I}_0 \cdot (1 - \dot{a})}{(\dot{a}^2 - \dot{a})}
\end{array} \right. \quad (3.7)$$

Выразим $\dot{Z}_{1.1}$ из четвертого уравнения системы уравнений (3.7):

$$\begin{aligned}
(\dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1}) &= (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) \cdot \left(\frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} - \dot{Z}_{1.1} \right) \\
(\dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1}) &= \frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} \cdot (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) - (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) \cdot \dot{Z}_{1.1} \\
(\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) \cdot \dot{Z}_{1.1} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1} &= \frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} \cdot (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) - \dot{U}_{1a} \\
-\dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_{1.1} &= \frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д}} \cdot (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) - \dot{U}_{1a} \\
\dot{Z}_{1.1} &= \frac{\dot{U}_{1a}}{\dot{I}_0} - \frac{\dot{U}_{1Д}}{\dot{I}_{1Д} \cdot \dot{I}_0} \cdot (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0)
\end{aligned}$$

Удельные значения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей для одноцепной ЛЭП без грозотроса рассчитаны с

помощью «Программы расчета параметров ЛЭП PL62W+» авторов Гусева С.В. и Мелюхова И.А. Исходными данными для расчета являются параметры опоры марки ПБ10-1Б, изолятора марки ПС-70Д, провода марки АС-50/8, которые получены из [47]. Таким образом, в результате расчета получились следующие значения:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = 0,6 + j0,4 \text{ Ом/км,}$$

$$\dot{Z}_0 = 0,75 + j1,5 \text{ Ом/км.}$$

Зная сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, определим значение емкости фазы ЛЭП относительно земли и величину переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_{1.1} = \frac{\dot{U}_{1a}}{\dot{I}_0} - \frac{\dot{U}_{1д}}{\dot{I}_{1д} \cdot \dot{I}_0} \cdot (\dot{I}_{1a} - \dot{I}_0) \\ \dot{U}_1 = \dot{U}_{1a} - \dot{I}_{1a} \cdot \dot{Z}_{1.1} \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_{2a} - \dot{I}_{2a} \cdot \dot{Z}_{1.1} \\ \dot{U}_0 = \frac{3\dot{U}_{0a} - 3\dot{I}_0\dot{Z}_0 - \dot{U}_1 - \dot{U}_2}{4} \\ R_{\pi} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0}{3 \cdot \dot{I}_0} \\ C_1 = \frac{-\dot{I}_0}{3 \cdot j\omega \cdot \dot{U}_{0a}} \\ \dot{I}_{2a} = \dot{I}_C - \dot{I}_{1a} - \dot{I}_0 \\ \dot{I}_{1a} = \frac{\dot{I}_A - \dot{a} \cdot \dot{I}_C - \dot{I}_0 \cdot (1 - \dot{a})}{(\dot{a}^2 - \dot{a})} \end{array} \right.$$

Или

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{Z}_{1.1} = \frac{\dot{U}_{1a}}{I_0} - \frac{\dot{U}_{1д}}{i_{1д} \cdot I_0} \cdot (i_{1a} - i_0) \\
R_{\pi} = \left| \frac{\dot{U}_{1a} + \dot{U}_{2a} + \dot{U}_{0a} - i_{1a} \dot{Z}_{1.1} - i_{2a} \dot{Z}_{1.1} - i_0 \dot{Z}_0}{4 \cdot I_0} \right| \\
C_1 = \frac{I_0}{3 \cdot w \cdot U_{0a}} \\
i_{2a} = i_c - i_{1a} - i_0 \\
i_{1a} = \frac{i_A - \dot{a} \cdot i_c - i_0 \cdot (1 - \dot{a})}{(\dot{a}^2 - \dot{a})}
\end{array} \right.$$