

*Г.Г.Пивняк, Ф.П.Шкрабец, д-ра техн. наук, А.А.Дворников*  
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

## **АВАРИЙНЫЕ ТОКИ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП**

Обрыв провода одной из фаз воздушной ЛЭП в карьерных распределительных сетях составляет около 10% от всех видов повреждений. Степень опасности названного аварийного режима характеризуется переходом аварийного режима в однофазное замыкание на землю при касании оборванного провода земли. При этом, в зависимости от места разрыва провода по отношению к опоре ЛЭП, возможны три режима замыкания [2]:

- замыкание на землю со стороны источника (практически, классическое однофазное замыкание на землю);
- замыкание на землю со стороны электроприемника (касание земли проводом, связанным только с потребителем);
- замыкание на землю в двух точках, со стороны источника и со стороны электроприемника.

Первый случай относится к обычным достаточно изученным видам однофазных замыканий на землю. Второй случай характеризуется тем, что связь сети с землей осуществляется через сопротивления электроприемника. Третий случай возможен только при механическом разрыве фазного провода ЛЭП.

**Целью** настоящей работы является установление характера изменения тока замыкания и параметров нулевой последовательности при замыканиях на землю со стороны электроприемника и смешанных.

На рис. 1 представлена схема замещения распределительной сети с изолированной нейтралью, соответствующая режиму однофазного замыкания на землю со стороны электроприемника, для исследования аварийных токов и характеристик напряжения и токов нулевой последовательности составленная в соответствии с общепринятыми допущениями и ограничениями [1, 2, 3]. Будем считать также, что проводимость изоляции относительно земли участка поврежденной линии за местом повреждения равна нулю. На представленной схеме замещения кроме известных приняты следующие обозначения:  $x_n = \omega L_n$  - индуктивное сопротивление междуфазной обмотки электроприемника (активным сопротивлением обмоток электроприемника, учитывая их относительно малые значения, пренебрегаем);  $\dot{I}_{B3}$  - ток замыкания на землю фазы В через сопротивление нагрузки и переходное сопротивление  $r$  в месте повреждения;  $\dot{I}_{C3}$  - ток замыкания на землю фазы С через сопротивление нагрузки и переходное сопротивление  $r$  в месте повреждения.

Для представленной схемы замещения в соответствии с первым законом Кирхгофа запишем

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_{B3} + \dot{I}_{C3} = 0. \quad (1)$$

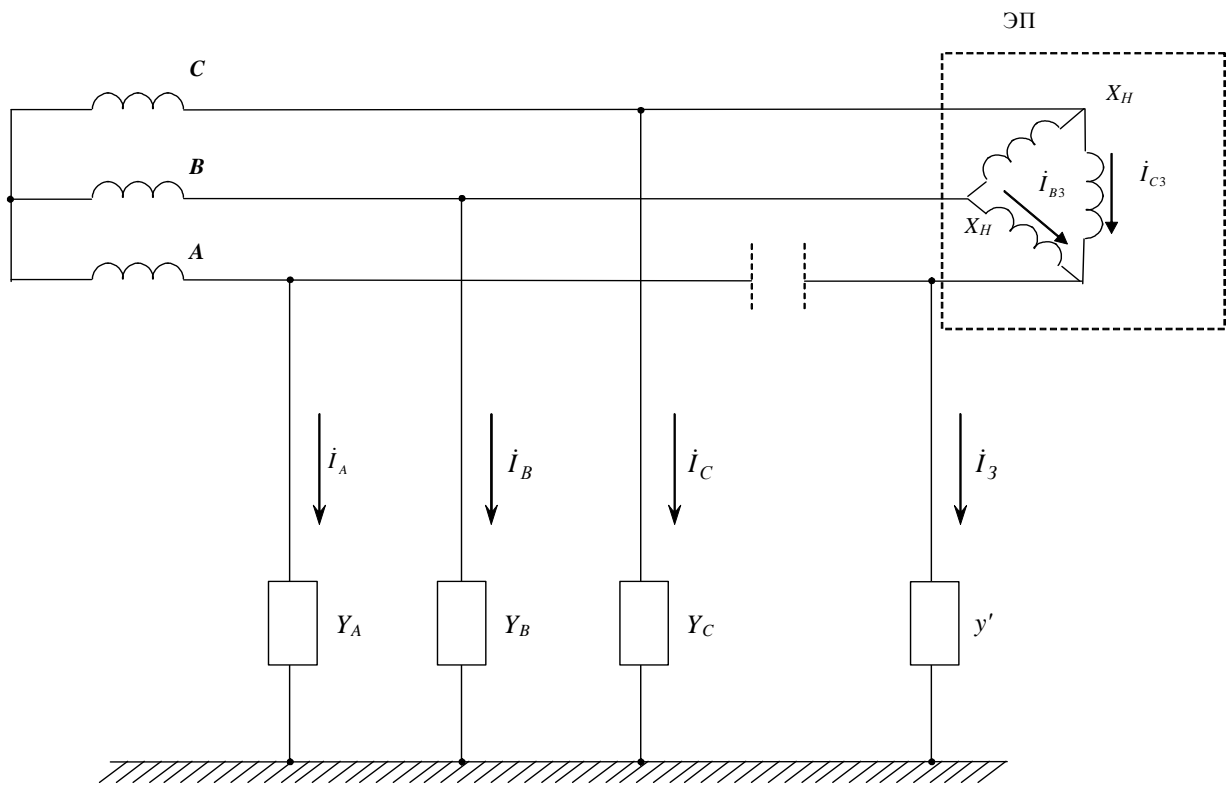


Рис. 1. Схема замещения распределительной сети при замыкании на землю со стороны электроприемника

Заменяя соответствующие токи их значениями, выраженными через напряжения и проводимости, и считая, что в нормальном режиме симметричной системы фазные напряжения представляют собой симметричную трехлучевую звезду, получим

$$3\dot{U}_0 Y + 2\dot{U}_0 y' + (\dot{U}_B + \dot{U}_C) y' = 0, \quad (2)$$

где  $y'$  - проводимость фаз В и С в месте повреждения с учетом сопротивлений обмоток электроприемника и переходного сопротивления в месте повреждения.

Учитывая, что

$$\dot{U}_B + \dot{U}_C = -\dot{U}_A$$

и решая уравнение (2) относительно  $\dot{U}_0$ , получим в общем виде выражение для напряжения нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю со стороны электроприемника в сети с изолированной нейтралью:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A y' / (3Y + 2y'). \quad (3)$$

Подставив в полученное выражение значения проводимостей

$$Y = 1/R + j\omega C, y' = 1/(r + j\omega L_H)$$

и проведя необходимое преобразование, выразим напряжение нулевой последовательности через параметры электрической сети и электроприемника.

Если, учитывая значительное превышение активного сопротивления изоляции сети над емкостным, принять значение активного сопротивлений изоляции сети относительно земли равным бесконечности, то для глухого однофазного замыкания на землю напряжение нулевой последовательности будет равно

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A / (2 - 3\omega^2 CL_H), \quad \text{или} \quad U_0 = U_\phi / (2 - 3\omega^2 CL_H).$$

Из последних выражений следует, что:

1) при глухом однофазном замыкании на землю со стороны электроприемника вектор напряжения нулевой последовательности совпадает по направлению с вектором напряжения поврежденной фазы, т.е. сдвигается на  $180^\circ$  по сравнению с вектором напряжения нулевой последовательности соответствующего глухому замыканию на землю фазы со стороны источника питания;

2) учитывая значение индуктивности обмоток карьерных электроприемников напряжением выше 1000 В (трансформаторы и приводные электродвигатели) можно считать, что даже при глухих замыканиях фазы на землю со стороны электроприемника действующее значение напряжения нулевой последовательности составляет примерно половину фазного.

Для исследования тока замыкания и характеристик токов нулевой последовательности при замыканиях одной из фаз на землю со стороны электроприемника схема замещения распределительной сети должна быть представлена двумя присоединениями: первое присоединение соответствует параметрам защищаемой (контролируемой) линии; второе - параметрам всей внешней сети.

Ток однофазного замыкания на землю для данного случая в соответствии с принятыми ранее обозначениями определится выражением:

$$\dot{I}_3 = -3\dot{U}_0 Y = -3\dot{U}_A Y \frac{y'}{3Y + 2y'}, \quad (4)$$

где  $y' = 1/(r + j\omega L_H)$  - проводимость неповрежденных фаз сети относительно земли в месте повреждения с учетом электроприемника.

Если пренебречь влиянием активного сопротивления изоляции сети и присоединений, то при глухом замыкании фазы на землю со стороны электроприемника ток однофазного замыкания и соответствующие токи нулевой последовательности определяются выражениями:

$$I_3 = 3U_\phi \omega C / (2 - 3\omega^2 CL_H), \quad (5)$$

$$I_0 = 3U_\phi \omega (C - C_1) / (2 - 3\omega^2 CL_H), \quad (6)$$

$$I_{0C} = 3U_\phi \omega C_1 / (2 - 3\omega^2 CL_H). \quad (7)$$

Полученные выражения (5) – (7) значительно отличаются от приведенных ниже известных выражений для соответствующих токов при обычном глухом замыкании одной фазы сети на землю (со стороны источника) [2, 4]:

$$I_3 = 3U_\phi \omega C, \quad I_0 = 3U_\phi \omega (C - C_1), \quad I_{0C} = 3U_\phi \omega C_1.$$

При разрыве провода воздушной ЛЭП между точками крепления возможно замыкание на землю со стороны источника и со стороны электроприемника одновременно. Хотя такое повреждение и является маловероятным, следует рассмотреть влияние параметров сети и переходных сопротивлений на характеристики тока замыкания, а также напряжения и токов нулевой последовательности с целью оценки поведения при таком повреждении существующих методов и устройств защиты и учета результатов при разработке новых средств защиты от несимметричных повреждений.

Схема замещения распределительной сети, соответствующая рассматриваемому повреждению, представлена на рис. 2. Для представленной схемы замещения проведя необходимые преобразования получим выражения для сети с изолированной нейтралью при смешанном однофазном повреждении:

- для напряжения нулевой последовательности

$$\dot{U}'_0 = -\dot{U}_A (y'_1 - y'_2) / (3Y + 2y'_2 + y'_1); \quad (8)$$

- для тока однофазного замыкания на землю

$$\dot{I}'_3 = -3\dot{U}'_0 Y = 3\dot{U}_A (Y - Y_1) \frac{y'_1 - y'_2}{3Y + 2y'_2 + y'_1}; \quad (9)$$

- для тока нулевой последовательности

$$\dot{I}'_0 = -3\dot{U}'_0 (Y - Y_1) = 3\dot{U}_A (Y - Y_1) \frac{y'_1 - y'_2}{3Y + 2y'_2 + y'_1}; \quad (10)$$

- для собственного тока контролируемого присоединения

$$\dot{I}'_{0C} = 3\dot{U}'_0 Y_1 = -3\dot{U}_A Y_1 \frac{y'_1 - y'_2}{3Y + 2y'_2 + y'_1}, \quad (11)$$

где  $y'_1 = 1/r_1$  - проводимость в точке повреждения со стороны источника питания;  $y'_2 = 1/(r_2 + j\omega L_H)$  - проводимость в точке повреждения со стороны элек-

тро-приемника относительно фаз В и С с учетом нагрузки.

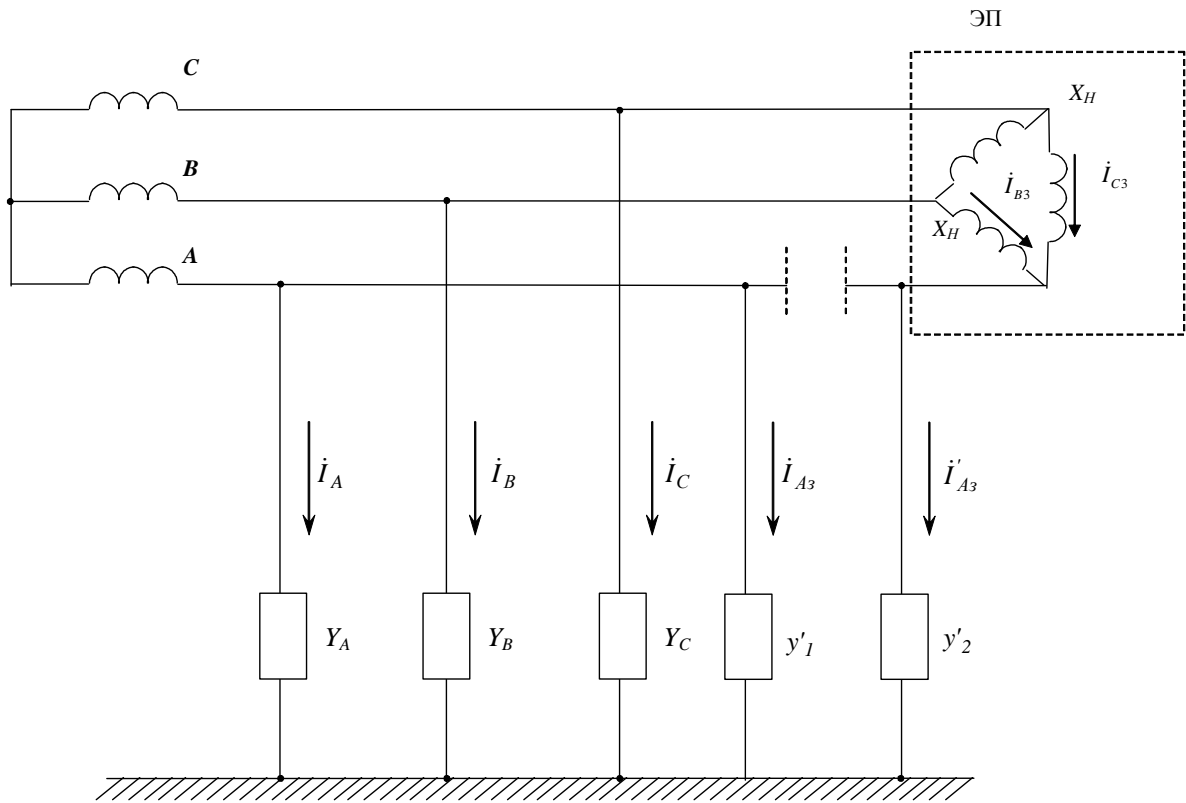


Рис. 2. Схема замещения сети при смешанном повреждении для исследования напряжения нулевой последовательности

В случае незаземленной нейтрали (включение дугогасящего реактора в нейтраль сети или высокоомного резистора) выражения для напряжения нулевой последовательности, тока замыкания и токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю со стороны электроприемника примут вид:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A y' / (3Y + Y_0 + 2y'); \quad (12)$$

$$\dot{i}_3 = -\dot{U}_0 (3Y + Y_0) = -\dot{U}_A (3Y + Y_0) \frac{y'}{3Y + Y_0 + 2y'}; \quad (13)$$

$$\dot{i}_0 = -\dot{U}_0 (3Y - 3Y_1 + Y_0) = -\dot{U}_A (3Y - 3Y_1 + Y_0) \frac{y'}{3Y + Y_0 + 2y'}; \quad (14)$$

$$\dot{i}_{0C} = 3\dot{U}_0 Y_1 = -3\dot{U}_A Y_1 \frac{y'}{3Y + Y_0 + 2y'}. \quad (15)$$

Характер изменения амплитудных и фазовых значений аварийных токов, напряжения и токов нулевой последовательности при повреждениях со стороны электроприемника в зависимости от параметров распределительной сети и пе-

реходных сопротивлений в месте повреждения представляет интерес с точки зрения оценки работоспособности существующих устройств защиты от несимметричных повреждений и необходим при разработке новых принципов выполнения и устройств защиты.

## Выводы

1. При повреждениях со стороны электроприемника в сетях с изолированной нейтралью действующее значение напряжения нулевой последовательности для реальных параметров изоляции сети и сопротивлений обмоток электроприемников даже при значении переходного сопротивления в точке повреждения равно нулю практически в два раза меньше соответствующего напряжения при замыканиях в той же сети со стороны источника питания.

2. Характер и степень влияния параметров изоляции сети относительно земли и значения переходного сопротивления в точке повреждения на значение напряжения нулевой последовательности и токов аналогичен влиянию указанных параметров при однофазном замыкании на землю со стороны источника.

3. Действующие значения тока нулевой последовательности и собственного тока поврежденного присоединения также определяются уровнем напряжения сети и параметрами изоляции соответствующих участков распределительной сети. Однако, по сравнению со значениями аналогичных токов для повреждений со стороны источника питания, их значения будут всегда почти в два раза меньше.

5. Характер и степень влияния режима настройки компенсирующего устройства и значения переходного сопротивления в точке повреждения на значение и фазу напряжения нулевой последовательности аналогичны влиянию указанных величин в случае замыкания фазы на землю со стороны источника.

6. Действующие значения тока нулевой последовательности и собственного тока контролируемого присоединения определяются уровнем напряжения сети, режимом компенсации и параметрами изоляции соответствующих участков распределительной сети, однако по сравнению с классическим видом замыкания их значения почти всегда будут в два раза меньше.

7. Фазовые характеристики параметров нулевой последовательности по сравнению с классическим видом замыканий при прочих равных условиях отличаются сдвигом соответствующих векторов на угол близкий к 180 град.эл.

8. Резистор в нейтрали сети при рассматриваемом повреждении по характеру влияния на параметры нулевой последовательности можно оценить как снижение активного сопротивления изоляции сети относительно земли в сети с изолированной нейтралью при том же повреждении.

9. При замыкании фазы на землю со стороны источника и электроприемника одновременно, действующие значения и положения векторов тока замыкания, а также токов и напряжения нулевой последовательности определяются в основном соотношением переходных сопротивлений в точках повреждения. Фазовые характеристики векторов напряжения и тока нулевой последовательности при смешанном повреждении теоретически могут изменяться в диапазо-

не  $270^\circ$  в сетях с изолированной нейтралью и в диапазоне  $360^\circ$  в сетях с компенсированной нейтралью.

#### Список литературы

1. Вильгейм Р. Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. -М.;-Л.: Госэнергоиздат, 1959. -415 с. .
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. – 192 с.
3. Лихачев Ф.В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. -М.: Энергия, 1972. -151 с.
4. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. -М.: Недра, 1976.-175 с.