

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ УЧЕТЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*Е.А. Конова*

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

*Анализируется поведение измерительного органа сопротивления дистанционной защиты при коротком замыкании через переходное сопротивление с учетом возможного изменения по модулю и фазе эквивалентных ЭДС источников по концам воздушной линии. По переходному сопротивлению при данном повреждении определяется оптимальная форма характеристики срабатывания измерительного органа сопротивления в плоскости Z.*

**Ключевые слова:** воздушная линия, дистанционная защита, измерительный орган сопротивления, короткое замыкание, переходное сопротивление, электрическая дуга, характеристика срабатывания.

Одной из основных защит линий электропередачи является трехступенчатая дистанционная защита (ДЗ), которая обеспечивает защиту линии, где она подключена, и резервирование защит смежных (последующих) линий и является обязательной [1].

В соответствии с дистанционным принципом защиты основным требованием, предъявляемым к характеристикам измерительных органов (ИО) сопротивления, является обеспечение действия при расчетных расстояниях (дистанциях) до места короткого замыкания (КЗ). Для обеспечения этого требования ИО сопротивления должен иметь характеристику срабатывания, охватывающую сопротивление защищаемой линии как при металлических КЗ, так и при КЗ через переходное сопротивление на линиях электропередачи [2, 3].

Переходные сопротивления  $R_F$  в общем случае определяются сопротивлениями электрических дуг  $R_{arc}$  при любых видах КЗ, а также сопротивлениями опор и их заземлений при КЗ на землю  $R_M$ .

Ввиду сложности процессов и влияния многих факторов на горение электрической дуги сопротивление ее оценивается приближенно. В первом приближении можно принять модуль действующего значения напряжения дуги на единицу длины постоянным  $U_{arc}^*$  и независимым от действующего значения тока  $I_{arc}$  [3]. В этом случае сопротивление дуги  $R_{arc}$  определяется соотношением

$$R_{arc} = U_{arc}^* l_{arc} / I_{arc}, \quad (1)$$

где  $l_{arc}$  – длина дуги, м;  $I_{arc}$  – ток, протекающий через дугу, А.

Значение  $U_{arc}^*$  в различных источниках колеблется в пределах 1000-3000 В/м (действующее значение) [3]. В отечественной практике используют значение  $U_{arc}^* = 1050$  В/м.

Для медленно действующих резервных ступеней ДЗ, когда отключение происходит с выдержкой времени, необходимо учитывать существенное возрастание дли-

ны дуги  $I_{arc}$  вследствие влияния ветра и динамических усилий в самой дуге. В этом случае для нахождения результирующего сопротивления дуги может быть использовано соотношение [4]

$$R_{arc.res} = R_{arc} \left( 1 + \frac{5Vt}{I_{arc}} \right), \quad (2)$$

где  $R_{arc}$  – сопротивление дуги в начальный момент, Ом;  $I_{arc}$  – длина дуги в начальный момент, м;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $t$  – время горения дуги, с.

Так, при двухфазном КЗ через переходное сопротивление на ВЛ 220 кВ, когда длина дуги  $l_{arc} = 7,85$  м, а ток, протекающий через дугу,  $I_{arc} = 2700$  А, сопротивление дуги в момент возникновения КЗ из (1) равно  $R_{arc} = 3,05$  Ом, а через 1 с при скорости ветра 4,7 м/с из (2) –  $R_{arc.res} = 12,18$  Ом.

Эквивалентное сопротивление опоры относительно земли  $R_M$  складывается из сопротивления самой опоры и сопротивления заземляющего контура опоры. Согласно ПУЭ сопротивление заземляющего контура опоры при токах промышленной частоты в летнее время должно быть не более  $10 \div 30$  Ом в зависимости от значения удельного эквивалентного сопротивления грунта.

При наличии грозозащитных тросов нужно учитывать влияние заземления других опор, так как опоры в этом случае электрически связаны. Данная связь существенно снижает результирующее сопротивление  $R_M$  [4].

В [4] показано, что, принимая значение активного сопротивления заземления опоры равным 10 Ом, удельное значение сопротивления грозозащитного троса –  $(0,234 + j0,748)$  Ом/км, длину пролета между опорами – 230 м, получим полное сопротивление заземления опоры, равное  $(0,54 + j0,4)$  Ом.

Основной особенностью измерения входного сопротивления ИО защиты, действующими при КЗ через переходное сопротивление, является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения. Указанное иллюстрируется рис. 1, где  $\underline{E}_1$ ,  $\underline{E}_2$ ,  $\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Z}_2$  – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем;  $\underline{Z}_{KZ1}$ ,  $\underline{Z}_{KZ2}$  – сопротивления участков защищаемой ВЛ до места повреждения;  $R_F$  – переходное сопротивление в месте повреждения.

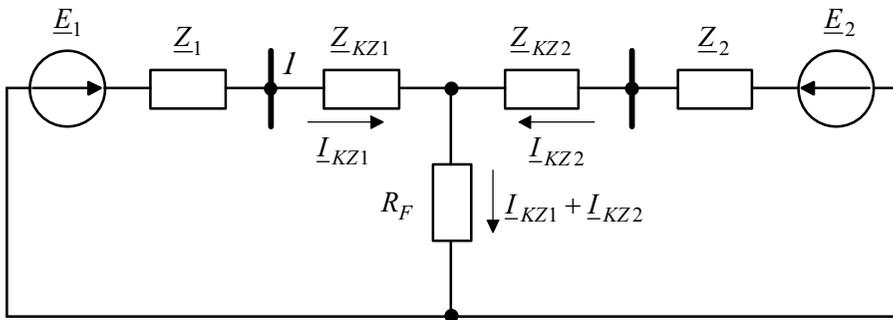


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения электрической системы при КЗ через переходное сопротивление

При КЗ на линии через переходное сопротивление ток  $\underline{I}_{KZ1}$  на входе ДЗ, установленной в точке 1, не равен току  $\underline{I}_{KZ1} + \underline{I}_{KZ2}$ , протекающему через переходное сопротивление  $R_F$ , вследствие подпитки места повреждения током  $\underline{I}_{KZ2}$  от противоположной части электрической системы (ЭС). Значение напряжения  $\underline{U}_{DZ}$  в месте установки ДЗ

$$\underline{U}_{DZ} = \underline{I}_{KZ1} \cdot \underline{Z}_{KZ1} + (\underline{I}_{KZ1} + \underline{I}_{KZ2}) R_F. \quad (3)$$

С учетом (3) сопротивление на зажимах ДЗ

$$\underline{Z}_{DZ} = \frac{\underline{U}_{DZ}}{\underline{I}_{KZ1}} = \underline{Z}_{KZ1} + \left( \frac{\underline{I}_{KZ1} + \underline{I}_{KZ2}}{\underline{I}_{KZ1}} \right) R_F = \underline{Z}_{KZ1} + \left( 1 + \frac{\underline{I}_{KZ2}}{\underline{I}_{KZ1}} \right) R_F. \quad (4)$$

Вычислив величины  $\underline{I}_{KZ1}$  и  $\underline{I}_{KZ2}$  в схеме рис. 1, получим после подстановки в (4) [5]

$$\underline{Z}_{DZ} = \underline{Z}_{KZ1} + R_F \frac{q(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{KZ1}) + \underline{Z}_{KZ2} + \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F - q \cdot R_F}, \quad (5)$$

где  $q = \frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1}$ .

Найдем области, в которых располагается сопротивление  $\underline{Z}_{DZ}$  на входе ДЗ при КЗ через переходное сопротивление с учетом ограничений:

1) соотношение ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  по модулю не выходит за пределы

$$q_1 \leq |q| \leq q_2, \quad (6)$$

где  $q_1 < 1$ ;  $q_2 > 1$  (рис. 2, окружности 1, 2);

2) из условия устойчивости ЭС угол  $\delta = \arg q$  не выходит за пределы

$$\delta_1 \leq \arg q \leq \delta_2, \quad (7)$$

где  $\delta_1 > -90^\circ$ ;  $\delta_2 < 90^\circ$ , что соответствует пределу устойчивости (рис. 2, прямые 3, 4).

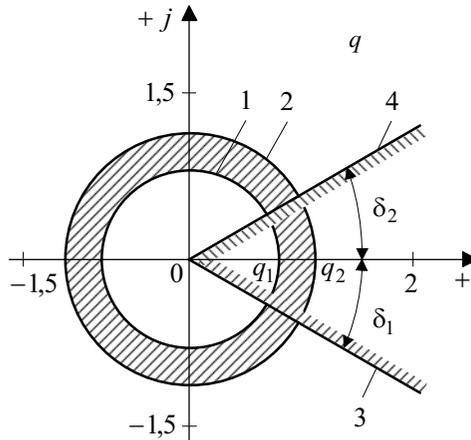


Рис. 2. Области изменения соотношений эквивалентных ЭДС по модулю и фазе в плоскости  $q$

Преобразуем (5) к виду

$$q = \frac{\underline{Z}_{DZ}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) - (\underline{Z}_{KZ1}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) + R_F(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2}))}{\underline{Z}_{DZ} \cdot R_F + \underline{Z}_1 \cdot R_F}. \quad (8)$$

Выражения (5) и (8) характеризуют дробно-линейное конформное отображение, поскольку эти выражения представляют собой дроби с выражениями первой степени в числителе и знаменателе.

Условие  $|q| \geq q_1$  с учетом (8) примет вид

$$\left| \frac{\underline{Z}_{DZ}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) - (\underline{Z}_{KZ1}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) + R_F(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2}))}{\underline{Z}_{DZ} \cdot R_F + \underline{Z}_1 \cdot R_F} \right| \geq q_1. \quad (9)$$

Обозначим [6]

$$\underline{k}_3 = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F, \quad (10)$$

$$\underline{k}_4 = -(\underline{Z}_{KZ1}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) + R_F(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2})), \quad (11)$$

$$\underline{k}_1 = R_F, \quad (12)$$

$$\underline{k}_2 = \underline{Z}_1 \cdot R_F, \quad (13)$$

$$\underline{a} = -\underline{k}_4 / \underline{k}_3, \quad (14)$$

$$\underline{b} = -\underline{k}_2 / \underline{k}_1, \quad (15)$$

$$k = |\underline{k}_1 / \underline{k}_3|. \quad (16)$$

Тогда выражение (9) приобретает вид

$$\left| \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} \right| \geq q_1 k. \quad (17)$$

Уравнение граничной линии этой области в комплексной плоскости  $Z$  получится при замене знака неравенства в (17) знаком равенства

$$\left| \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} \right| = q_1 k. \quad (18)$$

Граничная линия в комплексной плоскости при  $q_1 k \neq 1$  представляет собой окружность, центр  $\underline{Z}'_0$  и радиус  $R'_0$  которой равны [3, 5, 6]

$$\underline{Z}'_0 = \frac{\underline{a} - (q_1 k)^2 \underline{b}}{1 - (q_1 k)^2}, \quad R'_0 = q_1 k \left| \frac{\underline{a} - \underline{b}}{1 - (q_1 k)^2} \right|. \quad (19)$$

Таким образом, неравенство (9) определяет в плоскости  $Z$  область, расположенную вне окружности с параметрами по выражению (19).

Данная область построена на рис. 3 (область вне окружности 1) для  $q_1 = 0,82$  при следующих данных ЭС (см. рис. 1):  $\underline{Z}_1 = 10 \cdot e^{j74^\circ}$  Ом,  $\underline{Z}_2 = 5 \cdot e^{j60^\circ}$  Ом,  $\underline{Z}_{KZ1} = 15,3 \cdot e^{j65^\circ}$  Ом,  $\underline{Z}_{KZ2} = 2,7 \cdot e^{j65^\circ}$  Ом,  $R_F = 1$  Ом.

Условие  $|q| \leq q_2$ , также вытекающее из (6), приводит с учетом выражений (8), (10)÷(16) к неравенству

$$\left| \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} \right| \leq q_2 k. \quad (20)$$

Аналогично неравенство (20) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами  $\underline{Z}''_0$ ,  $R''_0$ , определяемыми по формулам

$$\underline{Z}''_0 = \frac{\underline{a} - (q_2 k)^2 \underline{b}}{1 - (q_2 k)^2}, \quad R''_0 = q_2 k \left| \frac{\underline{a} - \underline{b}}{1 - (q_2 k)^2} \right|. \quad (21)$$

Область, определяемая неравенством (20), построена на рис. 3 для  $q_2 = 1,22$  (область внутри окружности 2).

Найдем ограничения на область расположения  $\underline{Z}_{DZ}$ , определяемые условием (7) по предельным углам расхождения ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ . С учетом (8) условие (7) примет вид

$$\delta_1 \leq \arg \frac{\underline{Z}_{DZ}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) - (\underline{Z}_{KZ1}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2} + R_F) + R_F(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{KZ2}))}{\underline{Z}_{DZ} \cdot R_F + \underline{Z}_1 \cdot R_F} \leq \delta_2. \quad (22)$$

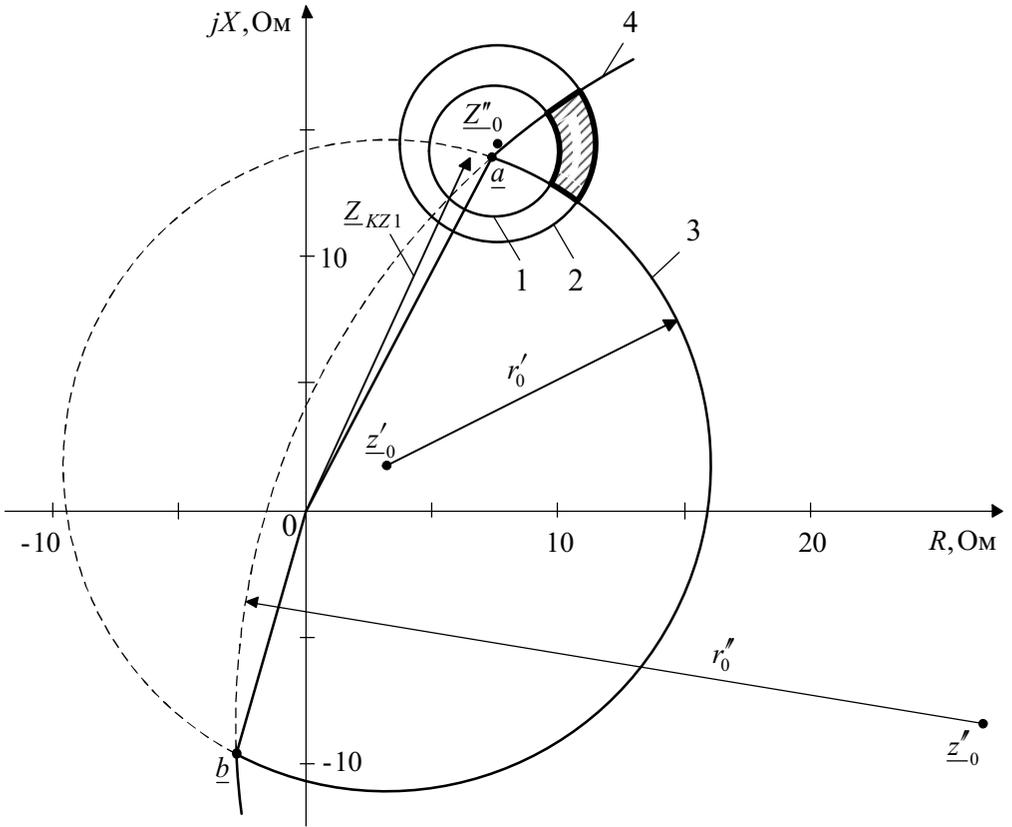


Рис. 3. Область расположения входного сопротивления ДЗ при КЗ через переходное сопротивление в плоскости  $Z$

Вводя обозначения (10)÷(15), а также

$$\arg \frac{k_3}{k_1} = \beta, \quad (23)$$

и учитывая, что аргумент произведения равен сумме аргументов множителей, преобразуем неравенство (22) к виду

$$\delta_1 - \beta \leq \arg \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} \leq \delta_2 - \beta. \quad (24)$$

Граничные линии будут характеризоваться равенствами:

$$\arg \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} = \delta_1 - \beta, \quad (25)$$

$$\arg \frac{\underline{Z}_{DZ} - \underline{a}}{\underline{Z}_{DZ} - \underline{b}} = \delta_2 - \beta. \quad (26)$$

Часть граничной линии, которая выражается уравнением (25), представляет собой при  $\delta_1 - \beta \neq 0$  и  $\delta_1 - \beta \neq \pi$  дугу окружности. Заданный угол  $\delta_1 - \beta$  является вписанным углом этой окружности, опирающимся на две точки той же окружности.

Следовательно, точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  должны лежать на граничной линии. Следует отметить, что уравнению (25) соответствует лишь та часть окружности, по которой от точки  $\underline{a}$  к точке  $\underline{b}$  движение происходит по часовой стрелке при отрицательном значении угла  $\delta_1 - \beta$  [6].

Центр  $\underline{z}'_0$  и радиус  $r'_0$  окружности равны

$$\underline{z}'_0 = \frac{\underline{a} + \underline{b}}{2} + j \frac{\underline{a} - \underline{b}}{2 \operatorname{tg}(\delta_1 - \beta)}, \quad r'_0 = \left| \frac{\underline{a} - \underline{b}}{2 \sin(\delta_1 - \beta)} \right|. \quad (27)$$

Аналогично часть граничной линии по выражению (26) является дугой окружности с вписанным углом  $\delta_2 - \beta$ , опирающейся на точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$ . Параметры окружности можно определить по формулам

$$\underline{z}''_0 = \frac{\underline{a} + \underline{b}}{2} + j \frac{\underline{a} - \underline{b}}{2 \operatorname{tg}(\delta_2 - \beta)}, \quad r''_0 = \left| \frac{\underline{a} - \underline{b}}{2 \sin(\delta_2 - \beta)} \right|. \quad (28)$$

Граничные линии, описываемые уравнениями (25), (26), построены на рис. 3 при  $\delta_1 = -30^\circ$ ,  $\delta_2 = 30^\circ$  (дуги окружностей 3 и 4 соответственно).

Результирующая область сопротивлений на входе ДЗ при КЗ через переходное сопротивление определяется как общая для условий (6) и (7) (заштрихованная область на рис. 3).

Для определения оптимальной конфигурации характеристики срабатывания ИО сопротивления ступеней ДЗ следует учитывать переходное сопротивление.

На рис. 4 показана характеристика срабатывания ИО сопротивления первой ступени ДЗ.

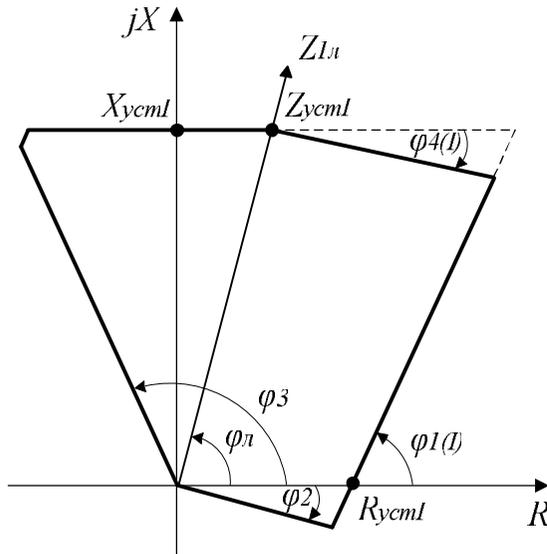


Рис. 4. Характеристика срабатывания ИО сопротивления первой ступени ДЗ

Приведенный выше анализ измеряемых сопротивлений при КЗ через переходное сопротивление позволяет определить следующие параметры рассматриваемой характеристики срабатывания:

- 1) уставка по оси  $R$ ,  $R_{ycml}$ ;
- 2) угол наклона правой боковой части характеристики  $\varphi_{1(l)}$ ;
- 3) угол наклона нижней правой части характеристики  $\varphi_2$ ;
- 4) угол наклона верхней правой части характеристики  $\varphi_{4(l)}$ .

Первые два параметра определяются с запасом значениями  $\operatorname{Re}(Z''_0 - Z_{KZ1}) + R''_0$  (см. рис. 3) в начале и конце зоны действия ИО сопротивления.

Третий и четвертый параметры определяются углом наклона прямой, проходящей через конец вектора  $Z_{KZ1}$  (при расчете угла наклона нижней правой части характеристики  $\varphi_2 Z_{KZ1} = 0$ ) и точку пересечения окружности 2 с дугой окружности 3 (см. рис. 3). При этом обеспечивается надежное срабатывание при близких повреждениях через переходное сопротивление (угол  $\varphi_2$ ) и отстройка зоны действия ИО сопротивления от КЗ в начале смежной (последующей) линии (угол  $\varphi_{4(l)}$ ).

Данные рассуждения справедливы и при выборе соответствующих параметров характеристик срабатывания ИО сопротивления второй и третьей ступеней ДЗ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.: ил.
2. Фабрикант В.Л. Дистанционная защита: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 215 с., ил.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с., ил.
4. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение: Пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
5. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.: ил.
6. Фабрикант В.Л. Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. – М.: Высш. школа, 1968. – 267 с.

*Статья поступила в редакцию 30 января 2012 г.*

## AN ANALYSIS OF DISTANCE PROTECTION OPERATION TAKING INTO ACCOUNT FAULT IMPEDANCE IN A SHORT CIRCUIT

**E.A. Konova**

A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University  
10, K. Marx st., Kazan, 420111

*Distance protection impedance-measuring unit response to a short circuit is analyzed by means of fault impedance taking into account possible differences between magnitudes and phase angles of equivalent voltages of the sources on overhead line ends. Knowing the fault impedance in these conditions, one can determine the desired parameters of impedance-measuring unit operating characteristics in the R-X diagram.*

**Keywords:** *overhead line, distance protection, impedance-measuring unit, short circuit, fault impedance, electrical arc, operating characteristic.*