

**Авторы:**  
 к.т.н. Н. А. Дони,  
 к.т.н. А. А. Шурупов  
 ООО НПП «ЭКРА»,  
 г. Чебоксары, Россия

д.т.н. РТУ В. Г. Гарке,

**Е. А. Конова**

КНИТУ им. А. Н. Туполева  
 (КАИ), Казань, Россия

# АНАЛИЗ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

УДК 621.316.925

## ANALYSIS OF MICROPROCESSOR-BASED DISTANCE PROTECTION OPERATION

**Аннотация:** рассмотрены нагрузочные и аварийные режимы работы линий электропередачи напряжением 110–220 кВ и их влияние на работу дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий и от коротких замыканий на землю.

**Ключевые слова:** нагрузочные и аварийные режимы электрической сети, микропроцессорная дистанционная защита, измерительные органы сопротивления

**N. A. Doni, A. A. Shurupov**  
 Limited liability company  
 Research-and-production  
 enterprise «EKRA»,  
 Cheboksary, Russia.  
**V. G. Garke, E. A. Konova**  
 Kazan National Research  
 Technical University named  
 after A.N. Tupolev (Kazan  
 aviation institute), Kazan,  
 Russia.

**Abstract:**

This paper is focused on the loading and emergency operation modes of overhead transmission lines at voltage 110–220 kV and their influence on operation of phase distance protection and ground distance protection.

**Keywords:**

loading and emergency modes of an electric network, microprocessor distance protection, impedance-measuring units

Современные микропроцессорные устройства дистанционной защиты (ДЗ) имеют сложные характеристики измерительных органов (ИО) в плоскости Z, что позволяет значительно повысить селективность и чувствительность защит. На рис. 1, для примера, представлены характеристики микропроцессорной ДЗ производства ООО НПП «ЭКРА» [1].

На рис. 1 показаны характеристики ИО сопротивления ДЗ от междуфазных коротких замыканий (КЗ): первой ( $Z_{уст.I}$ ), второй ( $Z_{уст.II}$ ), третьей ( $Z_{уст.III}$ ) и четвертой ( $Z_{уст.IV}$ ) ступеней. Дополнительная вторая ступень с охватом начала координат предназначена для работы только в двух режимах: «по памяти» и при опробывании ВЛ при ТН на линии. Кроме того, на рис. 1 показана характеристика ИО сопротивления первой ступени ДЗ от КЗ на землю ( $Z_{уст.Iз}$ ). Указанные характеристики могут регулироваться как по значению Z (X и R) срабатывания, так и по углам наклона отдельных частей (отрезков).

Рассматриваемые характеристики позволяют, с одной стороны, отстроиться от нагрузочных режимов, с другой стороны, охватить зоной срабатывания КЗ через переходные сопротивления в месте повреждения. Кроме того, новые характеристики ИО позволяют точнее учесть изменение сопротивления от подпитки при КЗ в зонах действия второй и третьей ступеней ДЗ. Новые возможности ИО сопротивления ДЗ требуют нового подхода к анализу всех возможных режимов электрических сетей и их влияния на работу защиты, как в случае ДЗ от междуфазных КЗ, так и в случае ДЗ от КЗ на землю ИО сопротивления измеряют сопротивление прямой последовательно-

сти  $Z_1$  линии электропередачи и других объектов. Для ДЗ от междуфазных КЗ входными величинами являются междуфазные напряжения:  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  и соответствующие разности двух фаз:  $I_A - I_B, I_B - I_C, I_C - I_A$ . Для ДЗ от КЗ на землю входными величинами являются фазные напряжения:  $U_A, U_B, U_C$  и фазные токи с компенсацией токов нулевой последовательности своей и параллельной линии.

В данной статье дается анализ аварийных и нагрузочных режимов линий электропередачи напряжением 110–220 кВ для расчета и выбора характеристик ИО всех ступеней ДЗ от междуфазных КЗ и от КЗ на землю.

Эквивалентная схема электрической сети для выбора уставок ДЗ линий электропередачи напряжением 110–220 кВ дана на рис. 2.

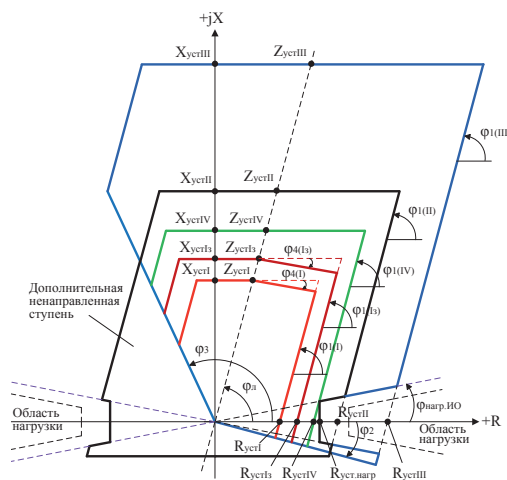


Рис. 1. Характеристики ИО сопротивления ДЗ

Анализ аварийных и нагрузочных режимов защищаемой электрической сети производится для эквивалентной схемы, рис. 2. При этом принимается ряд допущений [2]:

- многомашинная система преобразуется к двухмашинной;
- не учитываются поперечные емкости линий напряжением 110-220 кВ (протяженность меньше 200-250 км), работа автоматических регуляторов возбуждения, ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- отсутствие несимметрии трехфазной системы, за исключением несимметричных видов повреждения;
- принимается равенство сопротивлений в схемах прямой и обратной последовательностей;

сопротивления элементов рассматриваемой схемы принимаются линейными.

Анализируется влияние на работу ДЗ следующих факторов:

1. Подпитка от дополнительного источника ( $E_3$ ) при металлическом КЗ на линии Л2 (вторая и третья ступени ДЗ), рис. 2.
2. Режим КЗ через переходное сопротивление в месте повреждения.
3. Нагрузочный режим, от которого необходимо отстроиться.

**1. Расчет характеристик ИО сопротивления ДЗ с учетом влияния подпитки смежной линии**

Основной особенностью измерения входного сопротивления ступенями ДЗ с зонами действия за

пределами защищаемой линии, действующими, как правило, с выдержкой времени, является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения [3-5]. Данный режим иллюстрируется рис. 3, где  $E_1, E_3$  (подпитка),  $Z_1, Z_3$  – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем;  $Z_{Л1}$  – сопротивление защищаемой линии;  $Z_{КЗ}$  – сопротивление участка между концом защищаемой линии и местом повреждения при любых КЗ на линии Л2. Ток  $I_{КЗ1}$  на входе ДЗ, установленной в точке 1, не равен току  $I_{КЗ1} + I_{КЗ3}$ , протекающему по поврежденному участку линии в зоне резервирования, вследствие подпитки места повреждения током  $I_{КЗ3}$  от  $E_3$ .

Значение напряжения  $U_{ДЗ}$  в месте установки ДЗ (точка 1 на рис. 3)

$$U_{ДЗ} = I_{КЗ1} \cdot Z_{Л1} + (I_{КЗ1} + I_{КЗ3}) Z_{КЗ} \quad (1)$$

Тогда сопротивление на зажимах ДЗ

$$Z_{ДЗ} = \frac{U_{ДЗ}}{I_{КЗ1}} = Z_{Л1} + \frac{I_{КЗ1} + I_{КЗ3}}{I_{КЗ1}} Z_{КЗ} = Z_{Л1} + \left(1 + \frac{I_{КЗ3}}{I_{КЗ1}}\right) Z_{КЗ} \quad (2)$$

Выразим  $E_1$  и  $E_3$  через токи и сопротивления, рис. 3:

$$E_1 = I_{КЗ1} (Z_1 + Z_{Л1}) + (I_{КЗ1} + I_{КЗ3}) Z_{КЗ} \quad (3)$$

$$E_3 = I_{КЗ3} \cdot Z_3 + (I_{КЗ1} + I_{КЗ3}) Z_{КЗ} \quad (4)$$

Определим отношение  $I_{КЗ3}/I_{КЗ1}$ , решая систему уравнений (3), (4):

$$\frac{I_{КЗ3}}{I_{КЗ1}} = \frac{E_3 (Z_1 + Z_{Л1} + Z_{КЗ}) - E_1 \cdot Z_{КЗ}}{E_1 (Z_3 + Z_{КЗ}) - E_3 \cdot Z_{КЗ}} \quad (5)$$

После подстановки (5) в (2) получим:

$$Z_{ДЗ} = Z_{Л1} + Z_{КЗ} \frac{q(Z_1 + Z_{Л1}) + Z_3}{Z_3 + Z_{КЗ} - q \cdot Z_{КЗ}} \quad (6)$$

где  $q = \frac{E_3}{E_1}$ .

Найдем области, в которых располагается сопротивление  $Z_{ДЗ}$  на входе ДЗ при КЗ в зоне резервирования, с учетом ограничений:

$$q_1 \leq |q| \leq q_2 \quad (7)$$

$$\delta_1 \leq \arg q \leq \delta_2 \quad (8)$$

где  $q_1 < 1, q_2 > 1$ , по ГОСТ:  $q_1 = 0,9; q_2 = 1,1; \delta_1 > -90^\circ; \delta_2 < 90^\circ$ , что соответствует пределу устойчивости.

Преобразуем (6) к виду

$$q = \frac{Z_{ДЗ} (Z_3 + Z_{КЗ}) - (Z_{Л1} \cdot Z_3 + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ} + Z_3 \cdot Z_{КЗ})}{Z_{ДЗ} \cdot Z_{КЗ} + Z_1 \cdot Z_{КЗ}} \quad (9)$$

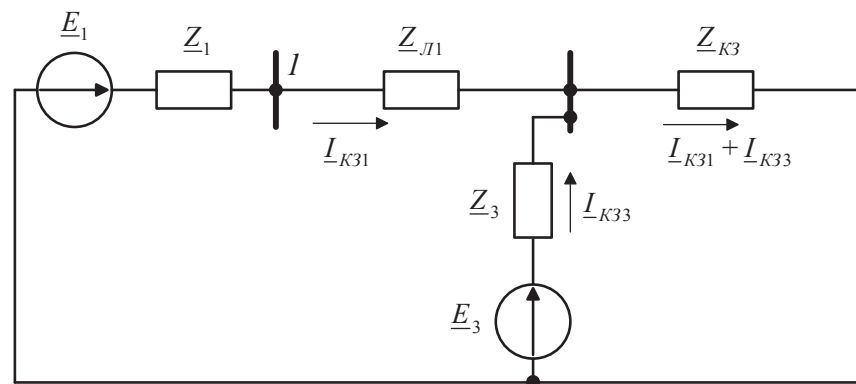


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения электрической системы при металлическом КЗ в зоне резервирования (II и III ступени ДЗ)

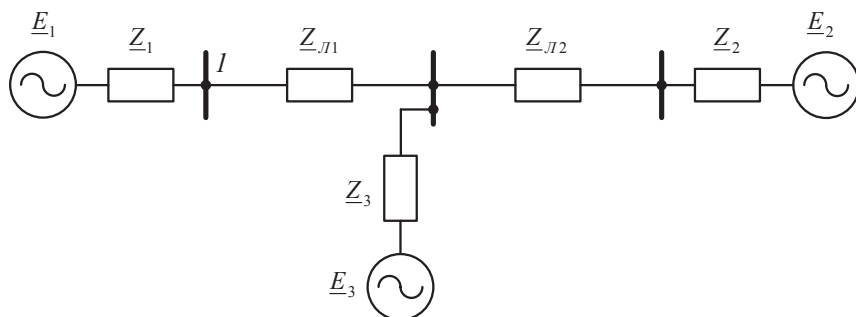


Рис. 2. Эквивалентная схема электрической сети:  $E_1, E_2$  и  $E_3$  – ЭДС систем 1, 2 и 3;  $Z_1, Z_2$  и  $Z_3$  – сопротивления систем 1, 2 и 3;  $Z_{Л1}$  и  $Z_{Л2}$  – сопротивления защищаемых объектов; 1 – место установки релейной защиты.

Условие (7) примет вид:

$$\left| \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{КЗ}) - (Z_{Л1} \cdot Z_3 + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ} + Z_3 \cdot Z_{КЗ})}{Z_{ДЗ} \cdot Z_{КЗ} + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ}} \right| \geq q_1 \quad (10)$$

$$\left| \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{КЗ}) - (Z_{Л1} \cdot Z_3 + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ} + Z_3 \cdot Z_{КЗ})}{Z_{ДЗ} \cdot Z_{КЗ} + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ}} \right| \leq q_2 \quad (11)$$

Граничной линией области, описываемой неравенством (10), в плоскости  $Z$  является окружность. Центр  $Z'_0$  и радиус  $R'_0$  окружности определяются соотношениями [4-7]:

$$Z'_0 = \frac{a - (q_1 k)^2 b}{1 - (q_1 k)^2} \quad (12)$$

$$R'_0 = q_1 k \left| \frac{a - b}{1 - (q_1 k)^2} \right| \quad (13)$$

где  $a = -k_4 / k_3$ ,  $b = -k_2 / k_1$ ,  $k = |k_1 / k_3|$  (14)

$k_3 = Z_3 + Z_{КЗ}$ ,  $k_4 = -(Z_{Л1} \cdot Z_3 + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ} + Z_3 \cdot Z_{КЗ})$ ,  $k_1 = Z_{КЗ}$ ,  $k_2 = Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ}$  (15)

Выражение (11) (при знаке равенства) соответствует граничной линии, которой является окружность с параметрами [4-7]:

$$Z''_0 = \frac{a - (q_2 k)^2 b}{1 - (q_2 k)^2} \quad (16)$$

$$R''_0 = q_2 k \left| \frac{a - b}{1 - (q_2 k)^2} \right| \quad (17)$$

В общем случае условие (7), ограничивающее соотношение модулей ЭДС, представляет собой область между окружностями, параметры которых определяются по выражениям (12), (13) и (16), (17).

Найдем ограничения области расположения  $Z_{ДЗ}$ , определяемые условием (8), по предельным углам расхождения ЭДС  $E_1$  и  $E_3$ . С учетом (9) условие (8) примет вид

$$\delta_1 \leq \arg \frac{Z_{ДЗ}(Z_3 + Z_{КЗ}) - (Z_{Л1} \cdot Z_3 + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ} + Z_3 \cdot Z_{КЗ})}{Z_{ДЗ} \cdot Z_{КЗ} + Z_{Л1} \cdot Z_{КЗ}} \leq \delta_2 \quad (18)$$

Вводя обозначение [6]

$$\arg \frac{k_3}{k_1} = \beta \quad (19)$$

и учитывая, что аргумент произведения равен сумме аргументов множителей, преобразуем неравенство (18) к виду:

$$\delta_1 - \beta \leq \arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} \leq \delta_2 - \beta \quad (20)$$

Из выражения (20) получаем два уравнения:

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} = \delta_1 - \beta \quad (21)$$

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} = \delta_2 - \beta \quad (22)$$

Эти уравнения являются геометрическим местом окружностей при  $\delta_1 \neq 0$  и  $\delta_1 \neq \pi$ ,  $\delta_2 \neq 0$  и

$\delta_2 \neq \pi$  [6]. Данные углы являются вписанными углами окружностей, опирающимися на две точки той же окружности. Следовательно, точки  $a$  и  $b$  должны лежать на граничной линии области [6]. Для одной окружности (21) координаты центра  $Z'_0$  равны:

$$Z'_0 = \frac{a+b}{2} + j \frac{a-b}{2 \operatorname{tg}(\delta_1 - \beta)} \quad (23)$$

Радиус  $r'_0$  окружности может быть найден по формуле

$$r'_0 = \left| \frac{a-b}{2 \sin(\delta_1 - \beta)} \right| \quad (24)$$

Аналогично получим окружность по выражению (22). Параметры окружности, центр  $Z''_0$  и радиус  $r''_0$ , равны:

$$Z''_0 = \frac{a+b}{2} + j \frac{a-b}{2 \operatorname{tg}(\delta_2 - \beta)} \quad (25)$$

$$r''_0 = \left| \frac{a-b}{2 \sin(\delta_2 - \beta)} \right| \quad (26)$$

На рис. 4 показана зона расположения конца вектора сопротивления на зажимах измерительного органа (ИО) сопротивления ДЗ при КЗ на смежной линии, которая имеет подпитку от источника питания ( $E_3$ ).

Подпитка от  $E_3$  приводит к увеличению сопротивления на зажимах ИО ДЗ, так как увеличивается падение напряжения на  $Z_{КЗ}$ . Следовательно, уставки II и III ступеней ДЗ нужно соответственно увеличивать.

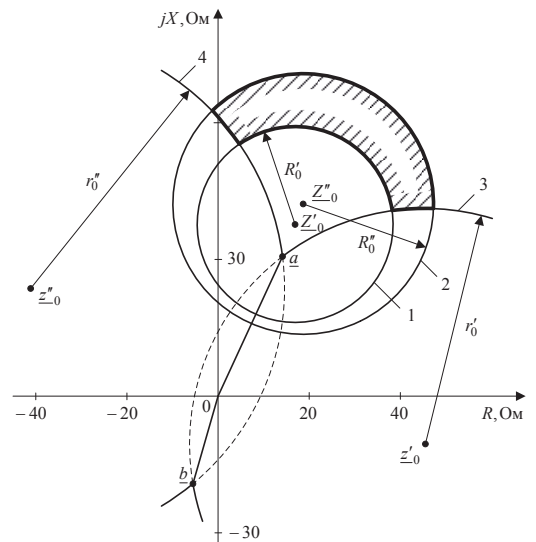


Рис. 4. Зона расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ при КЗ на смежной линии, которая имеет подпитку



Проведенный анализ позволяет определить расширение зоны с учетом подпитки и сопротивления на зажимах ИО II и III ступеней ДЗ более точно.

При отсутствии подпитки сопротивление на зажимах ИО сопротивления равно:

$$Z_{ДЗ} = a = Z_{Л1} + Z_{К3} \quad (27)$$

При наличии подпитки максимальное сопротивление на зажимах ИО сопротивления равно:

$$Z_{ДЗ} = Z''_0 + R''_0 \quad (28)$$

Угол этого сопротивления равен углу вектора сопротивления  $Z''_0$ , так как  $R$  – радиус.

### 2. Расчет характеристик ИО ДЗ с учетом влияния переходного сопротивления в месте КЗ

Переходное сопротивление в месте КЗ искажает замер ИО ДЗ, особенно при двухстороннем питании места повреждения. На рис. 5 дана эквивалентная схема замещения электрической сети при КЗ через переходное сопротивление.

Основной особенностью измерения входного сопротивления ступенями защит, действующими при КЗ через переходное сопротивление, является различие токов, протекающих в месте установки защиты и в месте повреждения [3-5]. Указанное иллюстрируется рис. 5, где  $E_1, E_2, Z_1, Z_2$  – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем;  $Z_{К31}, Z_{К32}$  – сопротивления участков защищаемой линии до места повреждения;  $R_{П}$  – переходное сопротивление в месте повреждения. При КЗ на линии через переходное сопротивление ток  $I_{К31}$  на входе ДЗ, установленной в точке 1, не равен току  $I_{К31} + I_{К32}$ , протекающему через переходное сопротивление  $R_{П}$  вследствие подпитки места повреждения током  $I_{К32}$  от противоположной части электрической системы. Значение напряжения  $U_{ДЗ}$  в месте установки ДЗ (точка 1)

$$U_{ДЗ} = I_{К31} \cdot Z_{К31} + (I_{К31} + I_{К32}) R_{П} \quad (29)$$

Тогда сопротивление на зажимах ДЗ:

$$Z_{ДЗ} = \frac{U_{ДЗ}}{I_{К31}} = Z_{К31} + \frac{I_{К31} + I_{К32}}{I_{К31}} R_{П} = Z_{К31} + \left(1 + \frac{I_{К32}}{I_{К31}}\right) R_{П} \quad (30)$$

Выразим  $E_1$  и  $E_2$  через токи и сопротивления, рис. 5:

$$E_1 = I_{К31} (Z_1 + Z_{К31}) + (I_{К31} + I_{К32}) R_{П} \quad (31)$$

$$E_2 = I_{К32} (Z_2 + Z_{К32}) + (I_{К31} + I_{К32}) R_{П} \quad (32)$$

Определим отношение  $I_{К31} / I_{К32}$ , решая систему уравнений (31), (32):

$$\frac{I_{К32}}{I_{К31}} = \frac{E_2 (Z_1 + Z_{К31} + R_{П}) - E_1 \cdot R_{П}}{E_1 (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) - E_2 \cdot R_{П}} \quad (33)$$

После подстановки (33) в (30) получим:

$$Z_{ДЗ} = Z_{К31} + R_{П} \frac{q (Z_1 + Z_{К31}) + Z_{К32} + Z_2}{Z_2 + Z_{К32} + R_{П} - q \cdot R_{П}} \quad (34)$$

где  $q = \frac{E_2}{E_1}$ .

Найдем области, в которых располагается сопротивление  $Z_{ДЗ}$  на входе ДЗ при КЗ через переходное сопротивление с учетом ограничений (7) и (8).

Преобразуем (34) к виду

$$q = \frac{Z_{ДЗ} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) - (Z_{К31} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) + R_{П} (Z_2 + Z_{К32}))}{Z_{ДЗ} \cdot R_{П} + Z_1 \cdot R_{П}} \quad (35)$$

Условие (7) примет вид:

$$\left| \frac{Z_{ДЗ} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) - (Z_{К31} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) + R_{П} (Z_2 + Z_{К32}))}{Z_{ДЗ} \cdot R_{П} + Z_1 \cdot R_{П}} \right| \geq q_1 \quad (36)$$

$$\left| \frac{Z_{ДЗ} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) - (Z_{К31} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) + R_{П} (Z_2 + Z_{К32}))}{Z_{ДЗ} \cdot R_{П} + Z_1 \cdot R_{П}} \right| \leq q_2 \quad (37)$$

Граничной линией области, описываемой неравенством (36), в плоскости  $Z$  является окружность [4-7]. Центр  $Z'_0$  и радиус  $R'_0$  окружности определяются соотношениями:

$$Z'_0 = \frac{a - (q_1 k)^2 b}{1 - (q_1 k)^2} \quad (38)$$

$$R'_0 = q_1 k \left| \frac{a - b}{1 - (q_1 k)^2} \right| \quad (39)$$

где  $a = -k_4 / k_3, b = -k_2 / k_1, k = |k_1 / k_3|$ , как и в (14);  $k_3 = Z_2 + Z_{К32} + R_{П}, k_4 = -(Z_{К31} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) + R_{П} (Z_2 + Z_{К32})), k_1 = R_{П}, k_2 = Z_1 \cdot R_{П}$ .

Выражение (37) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами [4-7]:

$$Z''_0 = \frac{a - (q_2 k)^2 b}{1 - (q_2 k)^2} \quad (41)$$

$$R''_0 = q_2 k \left| \frac{a - b}{1 - (q_2 k)^2} \right| \quad (42)$$

В общем случае условие (7), ограничивающее соотношение модулей ЭДС, представляет собой область между окружностями, параметры которых определяются по выражениям (38), (39) и (41), (42).

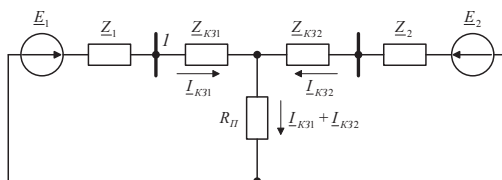
Найдем ограничения на области расположения  $Z_{ДЗ}$ , определяемые условием (8), по предельным углам расхождения ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . С учетом (35) условие (8) примет вид

$$\delta_1 \leq \arg \frac{Z_{ДЗ} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) - (Z_{К31} (Z_2 + Z_{К32} + R_{П}) + R_{П} (Z_2 + Z_{К32}))}{Z_{ДЗ} \cdot R_{П} + Z_1 \cdot R_{П}} \leq \delta_2 \quad (43)$$

Вводя обозначение [6]

$$\arg \frac{k_3}{k_1} = \beta \quad (44)$$

Рис. 5. Эквивалентная схема замещения электрической системы при КЗ через переходное сопротивление





**Дони**  
**Николай Анатольевич**  
 Директор по науке - заведующий отделом перспективных разработок. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.

и учитывая (14) и (40), и то, что аргумент произведения равен сумме аргументов множителей, преобразуем неравенство (43) к виду:

$$\delta_1 - \beta \leq \arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} \leq \delta_2 - \beta. \quad (45)$$

Из выражения (45) получаем два уравнения:

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} = \delta_1 - \beta, \quad (46)$$

$$\arg \frac{Z_{ДЗ} - a}{Z_{ДЗ} - b} = \delta_2 - \beta. \quad (47)$$

Эти уравнения являются геометрическим местом окружностей при  $\delta_1 \neq 0$  и  $\delta_1 \neq \pi$ ,  $\delta_2 \neq 0$  и  $\delta_2 \neq \pi$  [6]. Для одной окружности (46) координаты центра  $z'_0$  равны:

$$z'_0 = \frac{a+b}{2} + j \frac{a-b}{2 \operatorname{tg}(\delta_1 - \beta)}. \quad (48)$$

Радиус  $r'_0$  окружности может быть найден по формуле

$$r'_0 = \left| \frac{a-b}{2 \sin(\delta_1 - \beta)} \right|. \quad (49)$$

Аналогично получим окружность по выражению (47). Параметры окружности, центр  $z''_0$  и радиус  $r''_0$ , равны:

$$z''_0 = \frac{a+b}{2} + j \frac{a-b}{2 \operatorname{tg}(\delta_2 - \beta)}, \quad (50)$$

$$r''_0 = \left| \frac{a-b}{2 \sin(\delta_2 - \beta)} \right|. \quad (51)$$

На рис. 6 показана зона расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления при КЗ через переходное сопротивление с подпиткой от  $E_2$ .

КЗ через переходное сопротивление расширяет область сопротивлений на зажимах ИО ДЗ, что особо важно для I ступени ДЗ. Желатель-

но, чтобы вся эта область попадала в область срабатывания ИО сопротивления.

Из рис. 6 видно, что, зная зоны расположения вектора сопротивления на зажимах ДЗ при КЗ через переходное сопротивление в начале и в конце характеристики ИО сопротивления всех ступеней ДЗ, можно точно определить параметры характеристик, такие как:

- установки срабатывания по оси R;
- углы наклона правых боковых отрезков характеристик;
- углы наклона верхней правой части характеристики ИО сопротивления I ступени ДЗ от междуфазных КЗ и от КЗ на землю;
- углы наклона нижней правой части характеристики ИО сопротивления всех ступеней ДЗ.

### 3. Влияние нагрузочных режимов электрической сети на характеристику ИО дистанционной защиты

Эквивалентная схема электрической сети, в общем случае, в симметричном нагрузочном режиме, не сопровождающемся КЗ, представлена на рис. 7, где  $E_1, E_2$  и  $Z_1, Z_2$  – эквивалентные ЭДС и сопротивления системы с двусторонним питанием, приведенные к точке 1 (место установки ДЗ) [3-5].

В симметричном нагрузочном режиме ток  $I_H$  напряжение  $U_H$  и сопротивление  $Z_H$  на входе ДЗ определяются соотношениями [4, 5]:

$$I_H = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2}; \quad (52)$$

$$U_H = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}; \quad (53)$$

$$Z_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{E_1 - E_2} = \frac{Z_2 + q Z_1}{1 - q}. \quad (54)$$

Найдем области, в которых располагается сопротивление на входе ДЗ в нагрузочном режиме, с учетом ограничений (7) и (8).

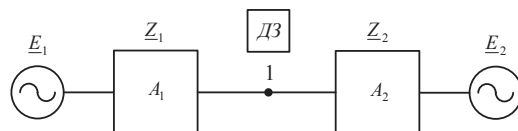
Преобразуем (54) к виду [6]

$$q = \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1}. \quad (55)$$

Условие  $|q| \geq q_1$  с учетом (55) примет вид

$$\left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| \geq q_1. \quad (56)$$

Уравнение граничной линии этой области в плоскости  $Z$  получится при замене знака неравенства в (56) знаком равенства:



**Рис. 6.** Зона расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ при КЗ через переходное сопротивление

**Рис. 7.** Канализу ДЗ в нагрузочных режимах электрической сети



**Шурупов  
Алексей Александрович**

Заведующий отделом защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». В 1973 г. закончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г.), старший научный сотрудник.

$$\left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| = q_1. \quad (57)$$

Обозначим [6]

$$k_3 = 1, k_4 = -Z_2, k_1 = 1, k_2 = Z_1. \quad (58)$$

Тогда выражение (57) с учетом (14) и (58) приобретает вид

$$\left| \frac{Z_H - a}{Z_H - b} \right| = q_1. \quad (59)$$

Граничной линией области, описываемой неравенством (56), в плоскости  $Z$  при  $q_1 \neq 1$  является окружность с центром в точке  $Z'_0$  и радиусом  $R'_0$ :

$$Z'_0 = \frac{a - q_1^2 b}{1 - q_1^2}, \quad (60)$$

$$R'_0 = q_1 \left| \frac{a - b}{1 - q_1^2} \right|. \quad (61)$$

Условие  $|q| \leq q_2$ , также вытекающее из (7), приводит с учетом (55) к неравенству

$$\left| \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \right| \leq q_2. \quad (62)$$

Выражение (62) соответствует области, границей которой является окружность с параметрами [6]

$$Z''_0 = \frac{a - q_2^2 b}{1 - q_2^2}, \quad (63)$$

$$R''_0 = q_2 \left| \frac{a - b}{1 - q_2^2} \right|. \quad (64)$$

В общем случае условие (7), ограничивающее соотношение модулей ЭДС, представляет собой область во внешней части двух окружностей, параметры которых определяются по выражениям (60), (61) и (63), (64).

При  $|q| = 1$ , то есть  $|E_2| = |E_1|$ , уравнение (59) приобретает вид

$$|Z_H - a| = |Z_H - b|. \quad (65)$$

В этом случае граничная линия – это геометрическое место точек, равноотстоящих от заданных точек  $a$  и  $b$ . Таким геометрическим местом является перпендикуляр к отрезку  $ab$ , восстановленный в его середине [6].

Найдем ограничения на области расположения  $Z_H$ , определяемые условием (8), по предельным углам расхождения ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . С учетом (55) условие (8) примет вид

$$\delta_1 \leq \arg \frac{Z_H - Z_2}{Z_H + Z_1} \leq \delta_2. \quad (66)$$

Вводя обозначения (14) и (58), преобразуем неравенств (66) к виду:

$$\delta_1 \leq \arg \frac{Z_H - a}{Z_H - b} \leq \delta_2. \quad (67)$$

Граничные условия (уравнения граничной линии) будут:

$$\arg \frac{Z_H - a}{Z_H - b} = \delta_1, \quad (68)$$

$$\arg \frac{Z_H - a}{Z_H - b} = \delta_2, \quad (69)$$

где  $\arg \frac{Z_H - a}{Z_H - b}$  – угол, на который вектор  $Z_H - b$  отстает от вектора  $Z_H - a$ . В комплексной плоскости  $Z$  векторы  $Z_H - a$  и  $Z_H - b$  представляются прямыми, соединяющими точку  $Z_H$  с точками  $a$  и  $b$ .

Из уравнения (68) видно, что, если точка  $Z_H$  лежит на той части граничной линии, которую выражается этим уравнением, то угол между прямыми, соединяющими точку  $Z_H$  с двумя неизменными точками плоскости  $a$  и  $b$ , должен быть постоянным и равным  $\delta_1$ . Эта часть граничной линии является, следовательно, геометрическим местом вершин заданного угла  $\delta$ , опирающегося на две неизменные точки. Как известно, такое геометрическое место представляет собой, при  $\delta_1 \neq 0$  и  $\delta_1 \neq \pi$ , дугу окружности [6]. Заданный угол является вписанным углом этой окружности, опирающимся на две точки той же окружности. Координаты центра  $Z'_0$  окружности

$$Z'_0 = \frac{a + b}{2} + j \frac{a - b}{2 \operatorname{tg} \delta_1}. \quad (70)$$

Радиус  $r'_0$  окружности может быть найден по формуле

$$r'_0 = \left| \frac{a - b}{2 \sin \delta_1} \right|. \quad (71)$$

Таким образом, уравнение (68) определяет в плоскости  $Z$  дугу окружности с параметрами  $Z'_0, r'_0$ , по выражениям (70), (71), соответственно.

Аналогично получим часть граничной линии в плоскости  $Z$ , соответствующую уравнению (69). Она представляет собой дугу окружности, опирающуюся на точки  $a, b$  и имеющую вписанный угол  $\delta_2$ . Параметры окружности, центр  $Z''_0$  и радиус  $r''_0$ , равны:

$$Z''_0 = \frac{a + b}{2} + j \frac{a - b}{2 \operatorname{tg} \delta_2}, \quad (72)$$

$$r''_0 = \left| \frac{a - b}{2 \sin \delta_2} \right|. \quad (73)$$

Резльтирующие области нагрузочных режимов определяются как общие для условий (7) и (8).

На рис. 8 построены области нагрузочных режимов – заштрихованные области вне дуг окружностей 1, 2, 4 в I и IV квадрантах и 1, 2 и 5 во II и III квадрантах плоскости  $Z$  для электрической сети с параметрами  $Z_1 \cdot e^{j74^\circ} \text{ Ом}$ ,  $Z_2 \cdot e^{j67^\circ} \text{ Ом}$ . Дуги окружностей 1 и 2 являются границами области по условию (7) при  $q_1 = 0,82$  и  $q_2 = 1,22$ , соответ-



**Коновая Елена Александровна,**  
 Дата рождения: 08.05.1987 г.  
 Окончила Казанский государственный энергетический университет в 2009 г. по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Аспирант кафедры Электрооборудования Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

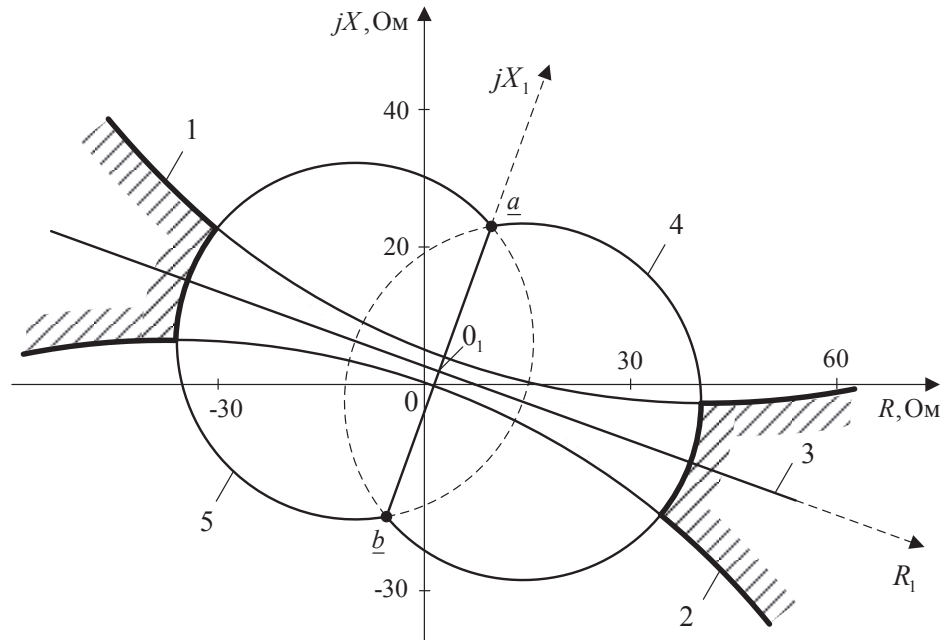


Рис. 8. Зоны расположения вектора сопротивления на зажимах ИО сопротивления ДЗ в нагрузочном режиме

ственно. Прямая 3, определяемая уравнением (65), соответствует  $|q| = 1$ . Граничные линии, соответствующие выражению (8), построены при  $\delta_1 = -60^\circ, \delta_2 = 60^\circ$  (соответственно дуги 4 и 5, опирающиеся на точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$ ).

Рис. 8 позволяет точно выбрать такие параметры характеристик ИО сопротивления ДЗ, как:

- угол наклона нижней левой части характеристики всех ступеней ДЗ;
- параметры (уставку по нагрузке и углы нагрузки) частей характеристик, называемых «вырезом нагрузки»;
- угол наклона «выреза нагрузки», на рис. 8 угол наклона оси нагрузки 3.

Анализ режимов работы сложной электрической сети напряжением 110–220 кВ с двухсторонним питанием позволяет наиболее полно учесть зоны сопротивления на зажимах ИО ДЗ при КЗ с подпиткой и при КЗ через переходное сопротивление, которые необходимо охватить характеристиками. При анализе нагрузочных режимов выявляется зона сопротивления нагрузки, от которой ИО сопротивления должны быть отстроены.

**Литература**

1. Шкаф дистанционной и токовой защит линий типа ШЭ2607 021021 и ШЭ2607 021. Руководство по эксплуатации. ЭКРА.656453.049. 2011.
2. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. - 152 с.
3. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. – М.: Высшая школа, 1978. 215 с.
4. Шнейерсон Э.М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
5. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
6. Фабрикант В. Л. Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. М.: Высшая школа, 1968. 267 с.
7. Аржанников Е. А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 176 с.