

## Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью

ИВАНОВ С.В., КЕРЖАЕВ Д.В.  
ООО «ИЦ «Бреслер»  
Российская федерация  
ivanov\_sv@ic-bresler.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Определение места повреждения, двойные замыкания на землю, сеть с изолированной нейтралью.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Статистика аварийных ситуаций показывает, что наиболее частым видом повреждений в сетях с изолированной нейтралью являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Доля этих режимов по разным данным составляет 75-90% от общего числа электрических замыканий [1]. Замыкание фазы на землю в таких сетях приводит к возрастанию напряжения в неповрежденных фазах в  $\sqrt{3}$  раз, что в свою очередь может привести к пробое изоляции и переходу ОЗЗ в двойное замыкание на землю ( $K^{(1)(1)}$ ). Актуальность исследования во многом обусловлена и тем, что из-за старения изоляции и общего износа оборудования в последнее время наблюдается неуклонный рост количества двойных замыканий на землю.

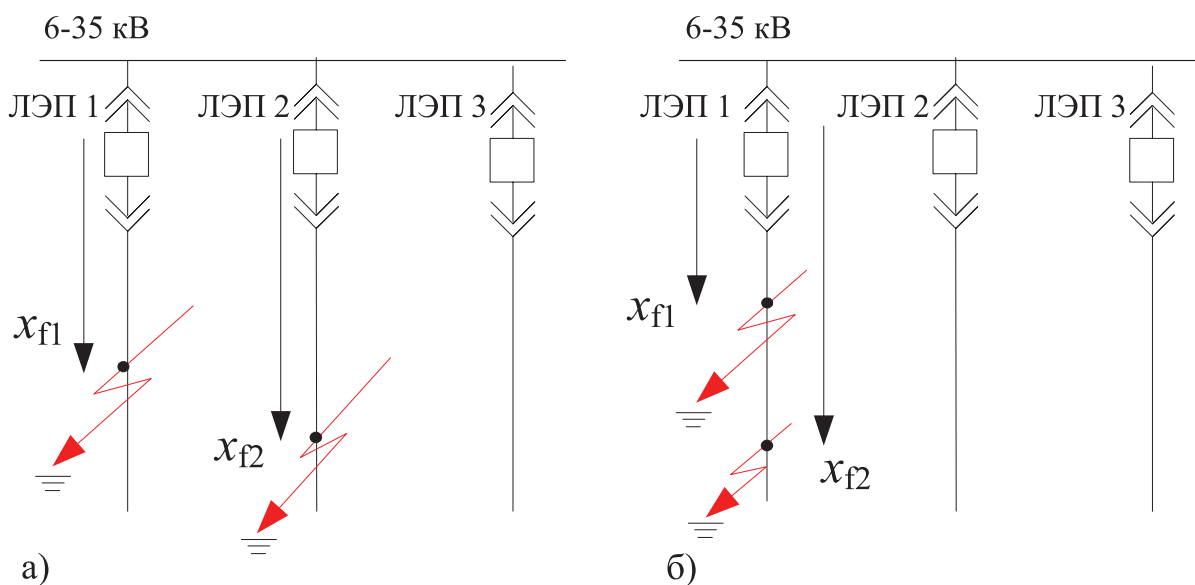
Режим двойного замыкания на землю близок к междуфазному замыканию, но, в отличие от него, при возникновении устойчивого двойного замыкания, не устранившегося в цикле АПВ, перед эксплуатацией встает нелегкая задача поиска сразу двух мест замыкания на землю. Целью исследования стала разработка алгоритмов определения места повреждения (ОМП) при двойном замыкании на землю, способных на основании одностороннего замера точно указать на обе точки пробоя изоляции.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

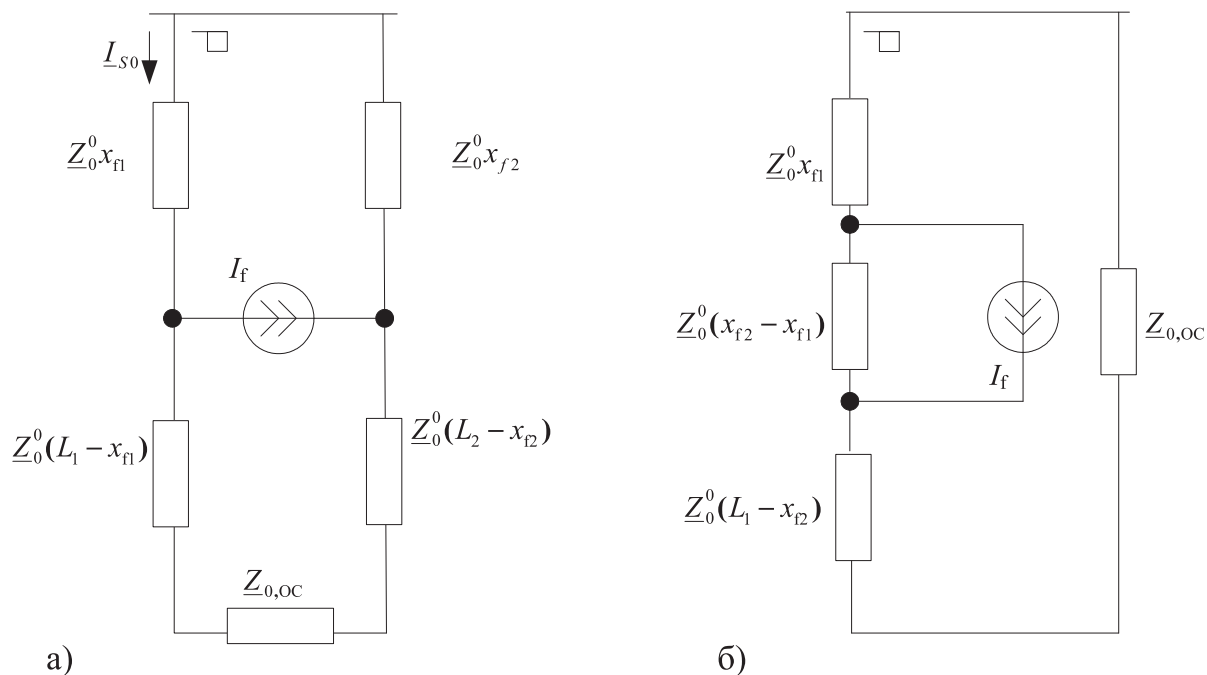
Отличительной особенностью двойных замыканий является тот факт, что замыкания на землю происходят сразу в двух точках линии электропередачи. Обозначим координаты мест повреждения соответственно  $x_{r1}$  и  $x_{r2}$ . В зависимости от взаимного расположения точек можно рассмотреть два случая (рис. 1). Первый, назовем его классическим, когда место первого повреждения находится на защищаемой линии, а место второго повреждения – «за спиной». Второй случай предполагает, что оба повреждения находятся в прямом направлении относительно места наблюдения.

Стоит учесть, что в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ преобладают простые линии без обходных связей. Что же касается линий напряжением 35 кВ, то на них наличие обходных связей – не редкость. Рассмотрим схему замещения линии электропередачи по нулевой последовательности (рис. 2). В схеме не участвуют подстанции и системы, не рассматривается влияние емкостной проводимости линий. Здесь  $L_1, L_2$  – длины первой и второй ЛЭП соответственно,  $Z_0^0$  – удельное сопротивление нулевой последовательности  $I_f$  – ток в месте короткого замыкания, а  $Z_{0,OC}$  – сопротивление обходной связи по нулевой последовательности. Для  $K^{(1)(1)}$  токи в местах повреждения одинаковы, но имеют противоположные направления.

Для случая по рис. 2а при бесконечном сопротивлении нулевой последовательности обходной связи  $Z_{0,OC}$  ток нулевой последовательности в месте повреждения совпадает с наблюдаемым током нулевой последовательности.



**Рис. 1:** Двойные замыкания на землю: а) на разных присоединениях, б) на одном



**Рис. 2:** Схема замещения  $K^{(1)(1)}$  по нулевой последовательности:

а) замыкание на разных присоединениях, б) замыкание на одном присоединении

## 2.1. Классическое двойное замыкание на землю

Общепринятыми критериями определения места повреждения [2] является резистивный характер дуги:

$$\text{Im}(R_p) = \text{Im}(U_{fv}/I_p) = 0, \quad (1)$$

как математическое отображение этого факта равенство нулю реактивной мощности повреждения:

$$Q(x_p) = \text{Im}(\underline{U}_v(x_p) \times \underline{I}_f^*(x_p)) = 0.$$

здесь  $\underline{U}_v$  – напряжение в месте повреждения для фазы  $v$ .

Основной проблемой решения уравнения является поиск тока. Для рассматриваемого случая ток в месте повреждения можно представить, как:

$$\underline{I}_f = K \underline{I}_{S0},$$

где  $K$  – поправочный коэффициент токораспределения; его можно принять действительным, если учесть, что большинство ЛЭП – короткие, находятся в одном сетевом районе, и справедливо равенство углов всех сопротивлений линий, а также обходной связи.

Для схемы рис 2 а:

$$K = 3 \frac{Z_0^0(L_2 + L_1 - x_{f1} - x_{f2}) + Z_{0,OC}}{Z_0^0(L_2 + L_1) + Z_{0,OC}} = 3 \frac{L_2 + L_1 - x_{f1} - x_{f2} + L_{OC}}{L_2 + L_1 + L_{OC}}, \quad (2)$$

В качестве примера приведено реальное короткое замыкание, произошедшее на ВЛ 35 кВ «МО-ЭСК» (рис. 3). Удельные параметры ВЛ:  $Z_1^0 = 0.43 + j0.41$  Ом/км;  $Z_0^0 = 0.58 + j1.33$  Ом/км. В предшествующем режиме напряжение фазы «А» близко к нулю, что свидетельствует о наличии ОЗЗ. Появление тока нулевой последовательности в свою очередь свидетельствует о возникновении классического двойного замыкания на землю. Токи в фазах «А» и «С» значительно больше номинала, что говорит повреждении фаз А и С. Соотношение между напряжениями и токами указывает на то, что фаза «А» повреждена за спиной, а фаза «С» – впереди.

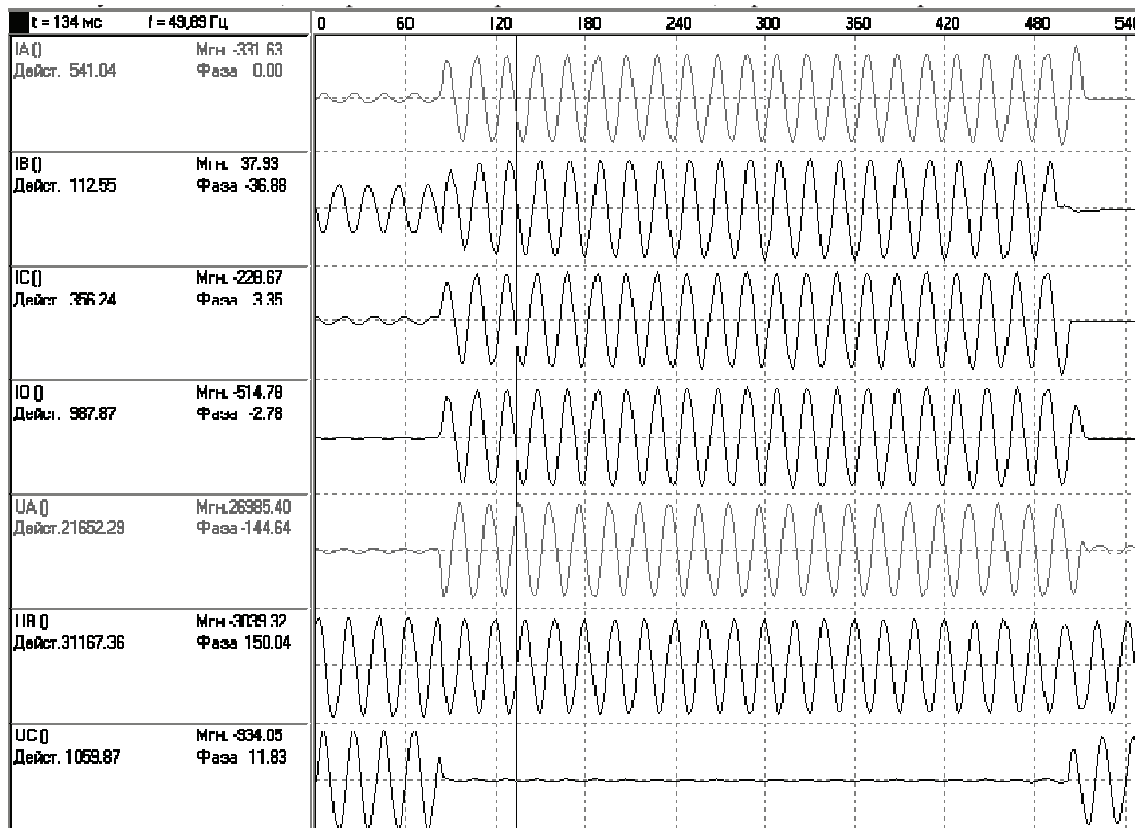


Рис. 3: Осциллограмма ОЗЗ передшедшего в двойное замыкания на землю

В режиме установившегося короткого замыкания напряжения и токи:

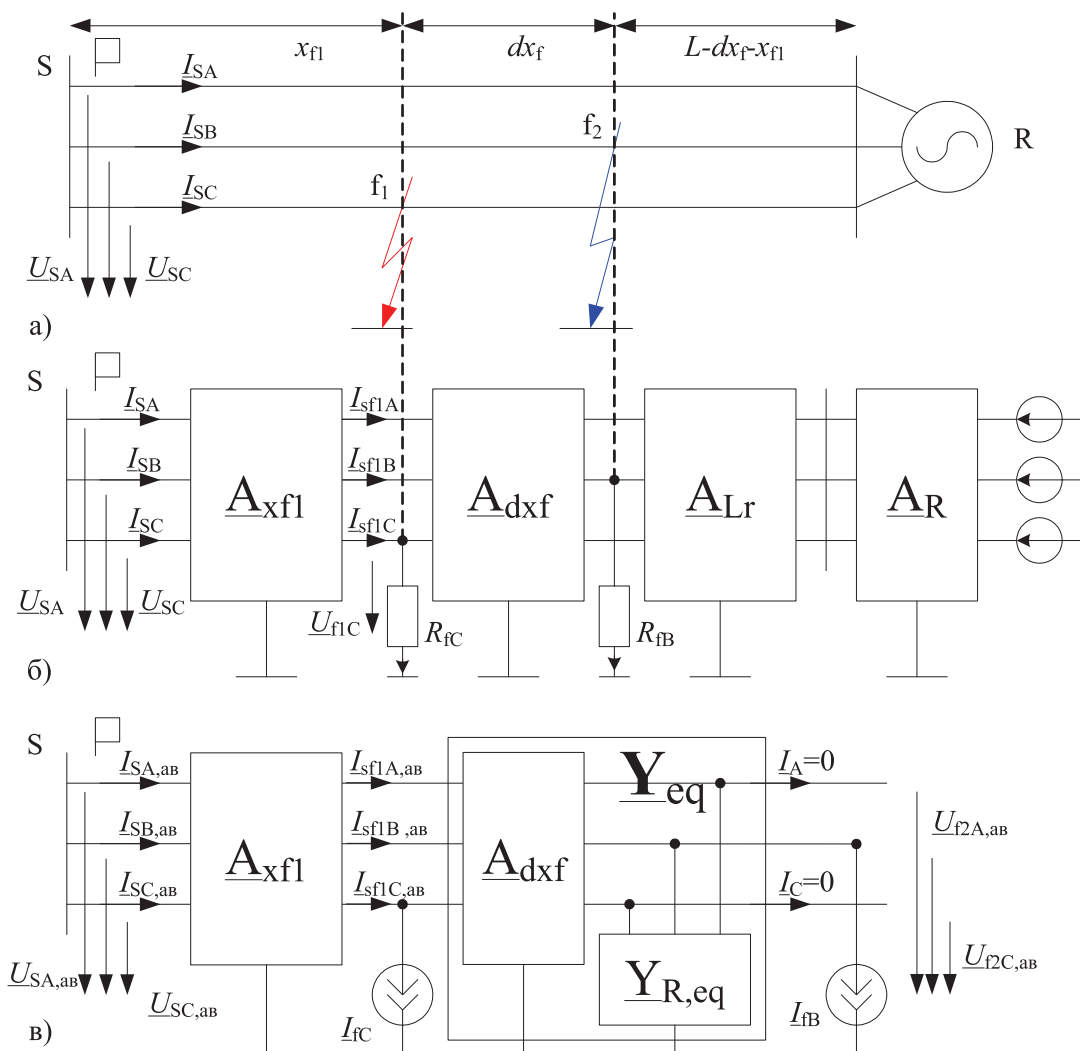
$\underline{U}_A = -17.6 - 12.5 \text{ кВ}$	$I_A = 541 \text{ А}$
$\underline{U}_B = -27 + 15.5j \text{ кВ}$	$I_B = 90 - 61j \text{ А}$
$\underline{U}_C = 1 + 0.21j \text{ кВ}$	$I_C = 355 + 21j \text{ А}$

**Табл. 1:** Токи и напряжения в аварийном режиме

Место замыкания впереди  $x_{f1} = 0.56 \text{ км}$ , а за спиной (если не учитывать сопротивления нагрузки)  $x_{f2} = 24.86 \text{ км}$ .

## 2.2. Двойное замыкание на одной линии

При исследовании двойного замыкания на одной ЛЭП, могут возникнуть сложности с определением того, повреждение в какой из фаз находится ближе к месту наблюдения. На рис. 4 а приведена схема двойного повреждения на защищаемой линии. Правая часть сети заменяется эквивалентной системой «R».



**Рис. 4:** Двойное замыкание: а) модель, б) и в) схемы замещения в виде каскадного соединения многополюсников в текущем режиме и в базисе чисто аварийных составляющих

Схему замещения линии удобно представить при помощи каскадного соединения многополюсников в форме «А» (рис 4б).

Здесь:  $\mathbf{V}_S = [U_{SA}, U_{SB}, U_{SC}, I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}]^T$  – напряжения на шинах подстанции S и токи в начале линии,  $I_{fB}, I_{fC}$  – токи в ветвях повреждения,  $R_{fB}, R_{fC}$  – соответственно переходные сопротивления в местах однофазных КЗ. Рассматривая место возникновения первого однофазного КЗ – точку  $x_{f1}$ , можно записать:

$$\mathbf{V}_{f1} = [U_{f1A}, U_{f1B}, U_{f1C}, I_{sf1A}, I_{sf1B}, I_{sf1C}]^T = \mathbf{B}_{xf1} \mathbf{V}_S.$$

Также, поскольку сопротивления дуги носят активный характер, должно соблюдаться соотношения для каждой из фаз. Для решения задачи ОМП удобно использовать базис аварийных составляющих (рис 4в). Как известно, для такой схемы источники будут находиться лишь в местах повреждений. С учетом этого правая часть преобразуется в пассивный многополюсник  $\mathbf{Y}_{Req}$ . Величины в месте повреждения  $x_{f1}$  и вместе наблюдения связаны соотношением:

$$\mathbf{V}_{f1,ав} = [U_{f1Aав}, U_{f1Bав}, U_{f1Cав}, I_{sf1Aав}, I_{sf1Bав}, I_{sf1Cав}]^T = \mathbf{B}_{xf1} \mathbf{V}_{s,ав}.$$

Для рассматриваемого примера очевидным является сонаправленность аварийной составляющей тока фазы «В» ( $I_{SB,ав}$ ) и аварийной составляющей тока фазы «А» ( $I_{SA,ав}$ ).

Для второй точки повреждения ( $x_{f2}$ ) характерны граничные условия  $I_{f2A,ав} = 0, I_{f2C,ав} = 0$ . Таким образом, в базисе аварийных составляющих схема замещения линии будет описываться шестью уравнениями с пятью неизвестными ( $U_{f2A,ав}, U_{f2B,ав}, U_{f2C,ав}, I_{fB}, I_{fC}$ ), что дает возможность включить в качестве дополнительного параметра переменную  $dx_f$  – расстояние между точками повреждения. При рассмотрении линии без учета емкости количество уравнений сократиться до 5, однако, при этом сократится количество неизвестных, поскольку в этом случае  $I_{fB} = I_{fC}$ .

Из приведенных выше рассуждений следует, что при известных аварийных составляющих режима для двойного замыкания на землю возможно однозначное определение места повреждения. В качестве примера определения места повреждения можно рассмотреть короткое замыкание, полученное с помощью модели ЛЭП (рис. 5). Удельные параметры ЛЭП соответствуют прошлому примеру.

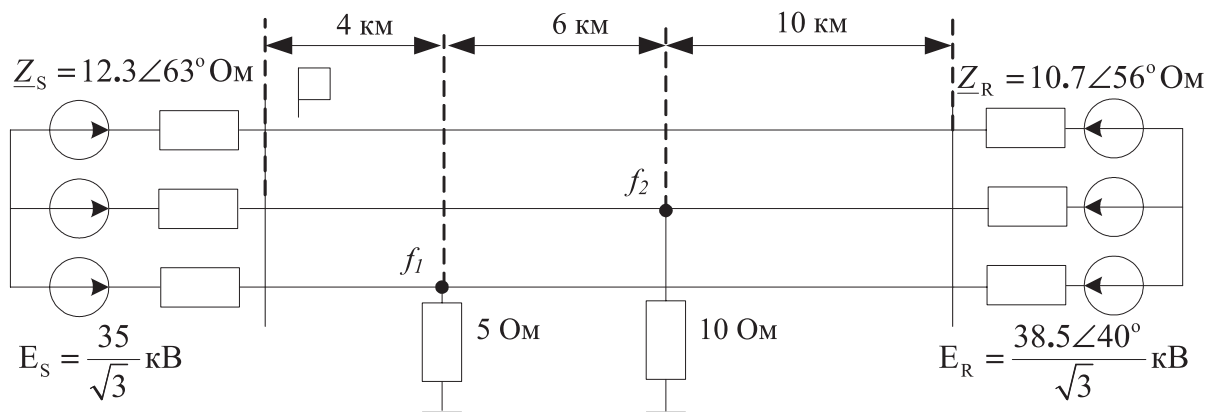


Рис. 5: Модель двойного замыкания на землю на линии 35 кВ

Токи и напряжения в предшествующем режиме, при ОЗЗ фазы С и двойном замыкании  $K_{B,C}^{(1)(1)}$  приведены в табл. 2.

На рис. 6 приведены зависимости  $\text{Im}(U_{f1,C} / I_{fC})$  и  $\text{Im}(U_{f2,B} / I_{fB})$  от мест предполагаемых замыканий. Оба графика пересекаются с нулем, в точке фактического места КЗ.

Режим	Напряжения	Токи
Предшествующий	$\underline{U}_A = 20920 \angle 0^\circ \text{В}$ $\underline{U}_B = 20920 \angle 240^\circ \text{В}$ $\underline{U}_C = 20920 \angle 120^\circ \text{В}$	$\underline{I}_A = 58.5 \angle 125^\circ \text{А}$ $\underline{I}_B = 58.5 \angle 5^\circ \text{А}$ $\underline{I}_C = 58.5 \angle 245^\circ \text{А}$
ОЗЗ ф «С»	$\underline{U}_A = 36339 \angle -30^\circ \text{В}$ $\underline{U}_B = 36366 \angle -90^\circ \text{В}$ $\underline{U}_C = 139 \angle -70^\circ \text{В}$	
Режим возникновения второго ОЗЗ ф «В»	$\underline{U}_A = 30731 \angle -7^\circ \text{В}$ $\underline{U}_B = 15995 \angle 255^\circ \text{В}$ $\underline{U}_C = 7321 \angle 78^\circ \text{В}$	$\underline{I}_A = 64.7 \angle 165^\circ \text{А}$ $\underline{I}_B = 592.1 \angle 23^\circ \text{А}$ $\underline{I}_C = 613.5 \angle 53^\circ \text{А}$

Табл. 2: Токи и напряжения имитационной модели

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены алгоритмы определения места повреждения для двухфазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью. Для замыканий различного типа предложены математические методы поиска обеих мест повреждения. Теоретические выводы, представленные в работе, подтверждены примерами расчетов. В исследовании приведен расчет точек повреждения по осциллограмме реального двухфазного замыкания на соседних линиях. Места повреждения, при двойном замыкании на одной и той же линии, рассчитаны по данным модели. Способы, рассмотренные в работе, внедрены в защитах линий производства ООО «ИЦ «Бреслер».

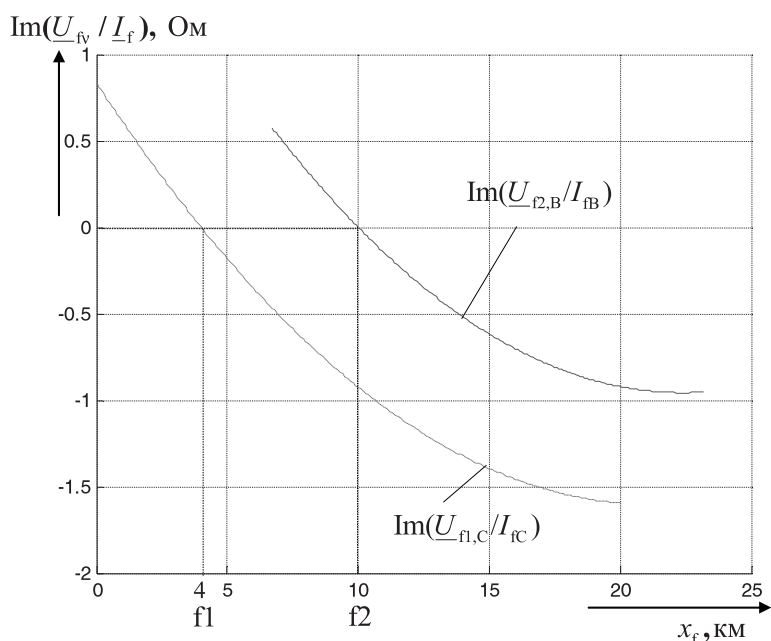


Рис. 6: Зависимость реактивного сопротивления дуги от мест предполагаемых повреждений

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты. — Новости Электротехники, 2005, № 1 (31), с. 73–75.
- [2] Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линий электропередачи. — Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвузовский сборник научных трудов, 1992.