

**Авторы:**  
Дони Н.А.,  
Мальи А.П.,  
Шурупов А.А.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

# УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМОИНДУКЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА ЗАМЕР РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## CALCULATION OF THE INFLUENCE OF MUTUAL INDUCTANCE OF PARALLEL LINES ON DISTANCE RELAY MEASUREMENTS

**Аннотация:** в статье приводится расчёт корректирующих множителей при коэффициентах компенсации тока нулевой последовательности, используемых в алгоритме фазного реле сопротивления для учёта влияния взаимной индукции параллельных линий на замер цифрового реле сопротивления. Приведен пример расчёта и даны рекомендации по выбору корректирующих множителей.

**Ключевые слова:** цифровое реле сопротивления, ток нулевой последовательности, взаимная индукция параллельных линий.

**Abstract:**

The article describes the calculation of corrective factors by compensation coefficients for the zero-sequence current utilized in the algorithm of digital phase distance relays. These factors are used to account for the influence of the mutual inductance of parallel lines on the digital phase distance relay measurements. An example of the calculation and recommendations regarding selection of the corrective factors are given.

**Keywords:**

digital distance relay, zero-sequence current, mutual inductance of parallel lines.

При КЗ на землю фазное напряжение  $u_\phi$  в месте установки защиты зависит не только от тока и напряжения линии, но и от тока нулевой последовательности параллельной линии (влияние фазных токов как прямой последовательности, так и обратной последовательности взаимно компенсируется).

Для линии, представленной R-L цепью, напряжение  $u_\phi$  петли КЗ, измеренное в месте установки защиты, определяется дифференциальным уравнением:

$$u_\phi = R_\phi(i_\phi + k_{Ri}i_0 + k_{MRi_{0P}}) + L_\phi(di_\phi/dt + k_{X}di_0/dt + k_{MX}di_{0P}/dt) \quad (1)$$

или в векторном виде:

$$\underline{U}_\phi = \underline{Z}_\phi(\underline{I}_\phi + \underline{k}_0\underline{I}_0 + \underline{k}_M\underline{I}_{0P}), \quad (2)$$

где  $\Phi$  = фазы А, В, С;

$R_\phi, L_\phi$  – активное сопротивление и коэффициент самоиндукции (индуктивность) фазы линии;

$i_\phi(\underline{I}_\phi), i_0(\underline{I}_0), i_{0P}(\underline{I}_{0P})$  – ток фазы, ток нулевой последовательности защищаемой линии и ток нулевой последовательности параллельной линии соответственно;

$k_{R} = kk_{R}(R_0 - R_1)/R_1, k_{X} = kk_{X}(X_0 - X_1)/X_1$ , – коэффициенты компенсации влияния токов нулевой последовательности на замер реле сопротивления по R и X соответственно,

где  $kk_{R}, kk_{X}$  – корректирующие множители коэффициента компенсации тока нулевой последовательности  $I_{0P}$  параллельной линии (по R и X соответственно);

$R_0, R_1$  – активные сопротивления нулевой и прямой последовательностей линии;

$X_0, X_1$  – индуктивные сопротивления нулевой и прямой последовательностей линии;

$\underline{k}_M = k_{MR} + jk_{MX}$  – комплексный коэффициент компен-

сации влияния взаимной индукции с параллельной линией по R и X на замер реле сопротивления;  $k_{MR} = R_M/R_1, k_{MX} = X_M/X_1$  – коэффициенты компенсации влияния взаимной индукции с параллельной линией по R и X на замер реле сопротивления, где  $R_M$  и  $X_M$  – активная и индуктивная составляющие сопротивления взаимной индукции линий.

Для линии с односторонним питанием, когда ток КЗ в повреждённой фазе  $I_\phi$  и ток в земле  $3I_0$  находятся в противофазе, вектор напряжения  $U_\phi$  может быть разложен по ортогональным составляющим:

$$\begin{aligned} U_{\phi X} &= X_1(I_\phi + k_X I_0 + k_{MX} I_{0P}) = \\ &X_1(I_\phi + kk_X I_0(X_0 - X_1)/X_1 + I_{0P} X_M/X_1) = \\ &X_1 I_\phi + kk_X I_0(X_0 - X_1) + I_{0P} X_M. \end{aligned} \quad (3)$$

И, аналогично,

$$U_{\phi R} = R_1 I_\phi + kk_R I_0(R_0 - R_1) + I_{0P} R_M. \quad (4)$$

Если к защите подведен ток параллельной линии и ток  $I_P$  в РС равен фазному току, компенсированному током нулевой последовательности своей и параллельной линии (с учётом коэффициента взаимной индукции):

$$\underline{I}_P = \underline{I}_\phi + \underline{k}_0 \underline{I}_0 + \underline{k}_M \underline{I}_{0P},$$

то замер сопротивления до места КЗ производится правильно при  $kk_{R} = kk_{X} = 1$ , и это сопротивление равно сопротивлению прямой последовательности линии  $Z_1$  до места КЗ (при этом токи параллельной линии должны подводиться от ТТ, установленного со стороны линии относительно выключателя, иначе в ремонтном режиме, когда параллельная линия будет отключена и заземлена с обеих сторон, её ток не будет подведён к защите).

Если ток параллельной линии к защите не подводится, то измеренное фазное напряжение  $\underline{U}'_\phi$  остаётся тем же, равным  $\underline{U}_\phi$ , что и при под-



веденном этом токе, но в расчётном уравнении (1) отсутствуют составляющие с током  $I_{0P}$ . Поэтому учёт влияния взаимоиндукции с параллельной линией производится корректирующими множителями  $kk_X$  и  $kk_R$  в формулах (3) и (4), теперь уже, в общем случае, не равными единице.

Компенсация в данном случае означает, что

$$I_0(X_0 - X_D) + I_{0P}X_M = kk_X I_0(X_0 - X_D), \quad (5)$$

$$I_0(R_0 - R_D) + I_{0P}R_M = kk_R I_0(R_0 - R_D), \quad (6)$$

отсюда:

$$kk_X = 1 + (I_{0P}/I_0) * (X_M / (X_0 - X_D)), \quad (7)$$

$$kk_R = 1 + (I_{0P}/I_0) * (R_M / (R_0 - R_D)). \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) являются универсальными для компенсации погрешности в замере РС при КЗ на землю в различных точках защищаемой линии и в различных режимах параллельной линии, а значения коэффициентов  $kk_X$  и  $kk_R$  зависят от соотношения векторов токов  $I_{0P}$  и  $I_0$  в конкретном режиме.

При этом правильный замер РС можно обеспечить только в одной расчётной точке и только для одного из режимов работы параллельной линии (выбранного), а не для всех возможных режимов [2], в частности, когда:

- параллельная линия отключена,
- параллельная линия включена,
- параллельная линия отключена и заземлена с обеих сторон.

Для режимов, не выбранных в качестве расчётного режима, замер РС будет происходить с погрешностью. Чтобы правильно учесть при компенсации все режимы, необходима была бы информация о состоянии параллельной линии с противоположной стороны. Такая информация в большинстве случаев отсутствует, не производится также учёт и других влияющих на замер факторов: сопротивления в месте КЗ, подпитки места КЗ с противоположной стороны линии.

Рассмотрим вначале более простой случай: КЗ в конце линии, а затем общий случай – при КЗ в произвольной точке защищаемой линии.

**Выбор корректирующих множителей  $kk_X$  и  $kk_R$  при расчётном КЗ в конце линии**

Возможны три варианта схем для выбора корректирующих множителей.

- 1) Параллельная линия отсутствует.

В этом случае отсутствует ток параллельной линии и его, естественно, учитывать не надо,  $I_{0P}$  равен нулю, поэтому

$$kk_R = kk_X = 1.$$

- 2) Параллельная линия имеется и к защите подведены токи параллельной линии (имеются аналоговые входы для них).

Без компенсации влияния токов нулевой последовательности параллельной линии за-

мер сопротивления при КЗ происходил бы неправильно. При включённой параллельной линии, например, измеренное сопротивление увеличивается по сравнению с действительным сопротивлением до места КЗ, и зона работы ДЗ сокращается.

При введении компенсации замер сопротивления на повреждённой линии происходит правильно во всех режимах работы параллельной линии. При этом коэффициенты компенсации также выбираются равными 1:

$$kk_R = kk_X = 1.$$

При этом следует учесть, что даже при использовании в защите повреждённой линии компенсации тока нулевой последовательности параллельной линии, на неповреждённой линии замер реле сопротивления при КЗ на параллельной линии уменьшается по сравнению с действительным, зона работы РС увеличивается и появляется возможность неселективной работы ДЗ на неповреждённой линии.

- 3) Параллельная линия имеется, но к защите не подведены токи параллельной линии (отсутствуют аналоговые входы для них).

Выбор коэффициентов компенсации  $kk_R$ ,  $kk_X$  при отключённой параллельной линии аналогичен выбору при отсутствии параллельной линии:

$$kk_R = kk_X = 1.$$

**Выбор коэффициентов  $kk_R$ ,  $kk_X$  при включённой параллельной линии при КЗ в конце линии – рис. 1.**

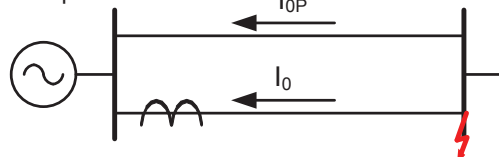


Рис. 1. Расчётная схема при КЗ в конце линии и включённой параллельной линии

В этом случае  $I_{0P} = I_0$  и из формул (7) и (8) следует:

$$kk_X = 1 + X_M / (X_0 - X_D), \quad (9)$$

$$kk_R = 1 + R_M / (R_0 - R_D).$$

Выбор коэффициентов  $kk_R$ ,  $kk_X$  при отключённой и заземлённой параллельной линии (ремонтный режим параллельной линии) при КЗ в конце линии – рис. 2.

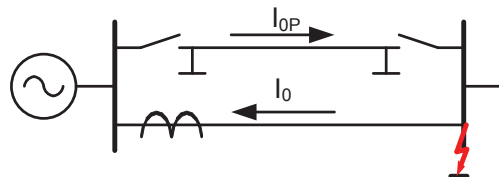


Рис. 2. Расчётная схема при КЗ в конце линии и отключённой и заземлённой параллельной линии



**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.



**Малый Альберт Петрович**

Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА». В 1958 г. закончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 г.), старший научный сотрудник.

В этом случае  $I_{0P} = -I_0 X_M / X_0$ , и из формул (7) и (8) следует:

$$kk_X = 1 - X_M^2 / (X_0(X_0 - X_I)), \quad (10)$$

$$kk_R = 1 - R_M^2 / (R_0(R_0 - R_I)).$$

В эти формулы коэффициенты взаимной индукции входят в квадрате, так как, во-первых, ток в параллельной линии возникает благодаря взаимной индукции, а во-вторых, он оказывает влияние на замер РС на повреждённой линии также благодаря взаимной индукции.

**Выбор корректирующих множителей  $kk_X$  и  $kk_R$  при расчёте КЗ в произвольной точке линии**

Выбор коэффициентов  $kk_R$ ,  $kk_X$  при включённой параллельной линии – рис. 3.

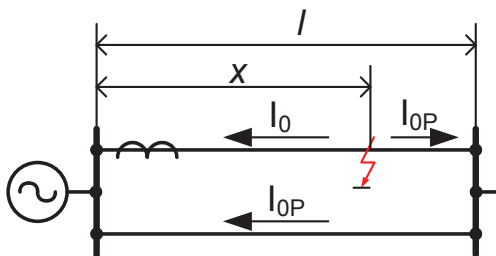


Рис. 3. Расчётная схема при включённой параллельной линии

Здесь КЗ на землю происходит на расстоянии  $x$  от места установки защиты при длине линии, равной  $l$  (доля  $m$  линии, входящая в зону защиты, равна  $m = x/l$ ).

Табл. 1. Коэффициенты компенсации и длина защищаемой зоны

Коэффициенты $kk_X$ рассчитаны при установке $X_I = 0,85 * X_{I \text{ линии}}$ для состояния параллельной линии:	Защищаемая зона в % от длины линии*		
	отключённой	включённой	отключённой и заземлённой
отключённой ( $kk_X = 1$ )	85	71	108
включённой ( $kk_X = 1,71$ )	108	85	132
отключённой и заземлённой ( $kk_X = 0,47$ )	65	56	85

\* В таблице длина защищаемой зоны рассчитана при компенсации замера РС при КЗ на расстоянии 85% от длины линии [2, стр. 326-331].

В этом случае влияние взаимной индукции проявляется только на части  $m$  от длины линии, поэтому ток параллельной линии равен  $I_{0P} = I_0 m / (2 - m)$ , и из формул (7) и (8) следует:

$$kk_X = 1 + (m / (2 - m)) * (X_M / (X_0 - X_I)), \quad (11)$$

$$kk_R = 1 + (m / (2 - m)) * (R_M / (R_0 - R_I)).$$

**Выбор коэффициентов  $kk_R$ ,  $kk_X$  при отключённой и заземлённой параллельной линии – рис. 4.**

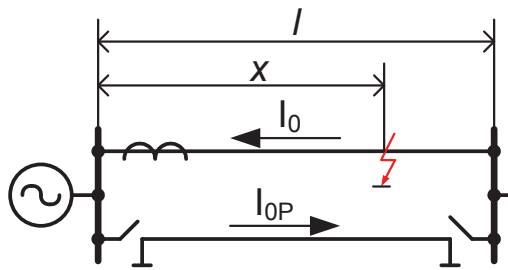


Рис. 4. Расчётная схема при отключённой и заземлённой параллельной линии

В этом случае ток параллельной линии индуцируется только на части  $m$  от длины линии и протекает навстречу току повреждённой линии, поэтому ток параллельной линии равен  $I_{0P} = -I_0 m X_M / X_0$ , и из формул (7) и (8) следует:

$$kk_X = 1 - m X_M^2 / (X_0(X_0 - X_I)), \quad (12)$$

$$kk_R = 1 - m R_M^2 / (R_0(R_0 - R_I)).$$

В формулах (9) – (12) проще использовать не абсолютные, а относительные параме-



Шурупов

Алексей Александрович

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

тры линии (обозначенные далее со штрихом).

На длину защищаемой зоны влияет коэффициент  $kk_X$ .

Коэффициенты  $kk_X$  и величины защищаемой зоны в процентах от длины линии в зависимости от расчётного и текущего состояния параллельной линии при реальных параметрах линии ( $X'_1 = 0,356 \text{ Ом/км}$ ,  $X'_{01} = 1,11 \text{ Ом/км}$ ,  $X'_{M1} = 0,72 \text{ Ом/км}$ ) приведены в табл. 1 [1, стр. 282].

Диагональ таблицы показывает, что в расчётном режиме параллельной линии выбранные коэффициенты обеспечивают одинаковые зоны срабатывания для междуфазных КЗ и КЗ на землю (0,85 от длины линии), а в других состояниях зона срабатывания расширяется или сокращается.

Использование значений коэффициентов  $kk_R = kk_X = 1$  приемлемо и для отключённой и включённой параллельной линии. При этом увеличение (до 108% в худшем случае – при одностороннем питании линии) зоны срабатывания РС на повреждённой линии в ремонтном режиме отключённой и заземлённой параллельной линии допустимо из-за того, что этот режим редкий и кратковременный. Кроме того, действие АПВ в таком режиме уменьшает вероятность потери селективности, учитывая, что большинство АПВ бывает успешным. Для полной гарантии селектив-

ности можно уменьшить  $kk_X$  на 20%, но за счёт сокращения защищаемой зоны в данном и других состояниях параллельной линии.

Для предотвращения неселективного срабатывания РС неповреждённой линии и обеспечения зоны срабатывания РС первой ступени защищаемой линии РС, равной 0,85 от длины линии, в алгоритме РС компенсация от параллельной линии блокируется, когда ток  $I_{0P}$  нулевой последовательности параллельной линии достигает 75% от тока  $I_0$  защищаемой линии:

$$I_{0P} = I_0 m / (2 - m) = 0,85 / (2 - 0,85) = 0,74.$$

Требования по компенсации влияния взаимной индукции параллельной линии на замер фазных РС резервных (второй и третьей) ступеней ДЗ иные, чем у РС первой ступени: важнее обеспечить чувствительность защиты в конце зоны ступени, чем селективность, поэтому методика выбора коэффициентов компенсации также иная [1, стр. 285-289].

Диапазон регулирования уставок корректирующих множителей  $kk_X$ ,  $kk_R$  – от 0 до 3,0.

Литература:

1. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. – М.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
2. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат. – 549 с. [5]

# Группа компаний "Интерэлектротехинжиниринг" ИВЭЛЕКТРОНАЛАДКА

Вместе с энергией!

Инжиниринговые услуги в электрических сетях и генерации  
РЗА, АСУ ТП, АИИС КУЭ «под ключ» / проект-монтаж-наладка /

**Объекты ОАО «ФСК ЕЭС»:**

- ✓ ПС 500 кВ «Западная»
- ✓ ПС 500 кВ «Каскадная»
- ✓ ПС 500 кВ «Дорохово»
- ✓ ПС 500 кВ «Звезда» и др.

**Коллектив ОАО "Ивэлектроналадка" и группа "Интерэлектротехинжиниринг"**

поздравляет генерального директора **Е.К. Журавлева** с наступающим юбилеем!

[www.iem.ru](http://www.iem.ru)

Редакция журнала присоединяется к поздравлениям от коллег генерального директора ОАО «Ивэлектроналадка» Евгения Константиновича Журавлева в связи с его 60-летним юбилеем.

Мы желаем этому всегда энергичному и жизнелюбивому руководителю широко известного коллектива российских наладчиков и члену редколлегии нашего журнала и в дальнейшем, ни при каких сложных жизненных ситуациях, не терять оптимизма, сохраняя на долгие годы блестящий юмор и блеск в глазах, острый ум и деловую хватку.