

О.Ю.ГЛЕБОВ, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В КАБЕЛЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ШИНАХ ПОДСТАНЦИИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В статті наведено розрахункові схеми та математичні вирази щодо визначення рівнів електромагнітних завод в кабелях вимірювальних трансформаторів напруги при короткому замиканні на шинах підстанції з метою забезпечення електромагнітної сумісності на енергетичних об'єктах.

For the purpose to provide the electromagnetic compatibility of substation, there are analytical models and mathematical equations for determination of electromagnetic disturbance into voltage measuring transformer cables during short circuit on high-voltage buses are given in the paper.

В статье приведены расчетные схемы и математические выражения для определения уровней электромагнитных помех в кабелях измерительных трансформаторов напряжения при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости на энергетических объектах.

Введение

Наиболее мощными источниками электромагнитных воздействий на открытых распределительных устройствах (ОРУ) электрических станций и подстанций являются короткие замыкания (КЗ) на шинах, прямой удар молнии или срабатывание ограничителей напряжения (ОПН) и разрядников. Общей особенностью указанных воздействий является стекание больших токов в заземляющее устройство (ЗУ), хотя формы импульсных токов, разумеется, существенно различаются. Однако, общая особенность этих воздействий позволяет разработать общую процедуру определения параметров электромагнитных помех в цепях релейных защит и автоматики (РЗА).

Целью данной работы является разработка процедуры определения параметров электромагнитных помех во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения (ТН) подстанций (ПС) для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) должны быть известны [1]: электромагнитная обстановка (ЭМО); механизм связи; чувствительность приемника помех. Различают следующие механизмы связи электромагнитных воздействий [2]: гальваническая связь; связь через электрическое поле; связь через магнитной поле; связь через излучение. Подобное разделение механизмов связи является весьма условным, поскольку в реальных электрических цепях два и более механизма проявляются одновременно, но для анализа процессов данное разделение механизмов связи является доста-

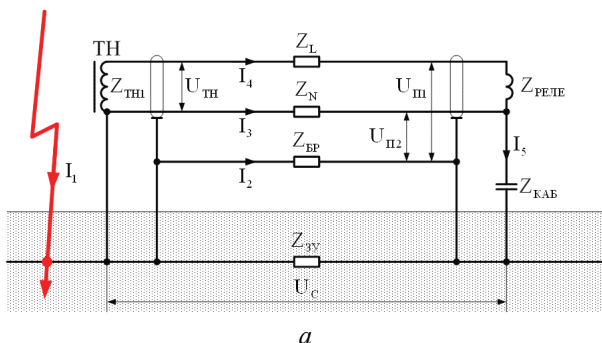
точно удобным. При КЗ на шинах ПС вторичные цепи оказываются гальванически связанными с первичными цепями.

Известно, что для выполнения цепей напряжения используют бронированные контрольные кабели. Цепи напряжения заземляются в одной точке, которая может быть расположена как вблизи устройств РЗА, так и вблизи ТН. Рабочий режим ТН близок к режиму холостого хода (ХХ), т.е. внутреннее сопротивление ТН значительно меньше сопротивления нагрузки ТН [3, 4].

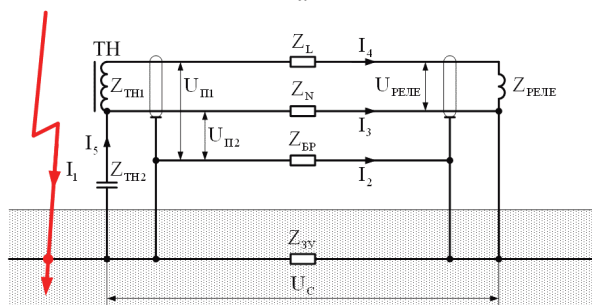
Для любого из указанных воздействий и любого варианта заземления цепей интерес представляет напряжение, прикладываемое к изоляции кабеля, а также напряжение, прикладываемое к реле напряжения.

1 Помехи в цепях напряжения

1.1. На рис. 1, а приведена схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН.



а



б

Рисунок 1 – Схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ:

а – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН;

б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{3У} \cdot Z_{БР} \cdot Z_1}{Z_{3У} \cdot Z_{БР} + Z_1 \cdot (Z_{3У} + Z_{БР})}, \quad (1)$$

где $Z_{3У}$ – сопротивление связи по элементам 3У между точками заземления брони кабеля; $Z_{БР}$ – сопротивление брони кабеля; Z_1 – сопротивление цепей напряжения, определяемое по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{КАБ}, \quad (2)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля; $Z_{КАБ}$ – емкость на землю заземленного проводника кабеля; Z_2 – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле:

$$Z_2 = Z_{ТН1} + Z_L + Z_{РЕЛЕ}, \quad (3)$$

где $Z_{ТН1}$ – индуктивная составляющая сопротивления вторичной обмотки ТН; Z_L – сопротивление фазного провода кабеля; $Z_{РЕЛЕ}$ – сопротивление реле (пускового органа защиты).

На высоких частотах сопротивления $Z_{ТН1}$ и $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше сопротивления Z_L , кроме того, сопротивление $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше сопротивления $Z_{ТН1}$ (поскольку ТН работает в режиме, близком к режиму ХХ), поэтому сопротивлениями Z_L и $Z_{ТН1}$ можно пренебречь, тогда сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$. Большое сопротивление Z_2 шунтировано меньшим сопротивлением Z_N , поэтому сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{3У}$, следовательно, сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{3У}$.

На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{КАБ}$ значительно больше сопротивлений Z_N и Z_2 , поэтому сопротивлениями Z_N и Z_2 можно пренебречь, тогда сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{КАБ}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{3У}$, следовательно, сопротивление Z_C по-прежнему близко к сопротивлению $Z_{3У}$.

Ток помехи I_5 , ответвляющийся с 3У в цепи напряжения:

$$I_5 = U_C / Z_1, \quad (4)$$

где U_C – напряжение на эквивалентном сопротивлении схемы Z_C , обусловленное растеканием воздействующего тока I_1 .

Ток I_2 , протекающий по броне кабеля:

$$I_2 = U_C / Z_{БР}. \quad (5)$$

Токи помехи в нулевом проводе I_3 и в реле I_4 :

$$I_3 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{КАБ}}{Z_N}; \quad (6)$$

$$I_4 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{КАБ}}{Z_2}. \quad (7)$$

Напряжения помехи между фазным проводом и землей $U_{П1}$, между ну-

левым проводом и землей $U_{\Pi 2}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{\text{ТН}}$ и на клеммах реле $U_{\text{РЕЛЕ}}$:

$$U_{\Pi 1} = I_4 \cdot Z_{\text{РЕЛЕ}} + I_5 \cdot Z_{\text{КАБ}} = U_C \frac{1}{Z_2} \left[Z_{\text{РЕЛЕ}} + \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1} (Z_2 - Z_{\text{РЕЛЕ}}) \right]; \quad (8)$$

$$U_{\Pi 2} = I_5 \cdot Z_{\text{КАБ}} = U_C \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1}; \quad (9)$$

$$U_{\text{ТН}} = I_4 \cdot Z_{\text{ТН1}} = U_C \left(1 - \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{ТН1}}}{Z_2}; \quad (10)$$

$$U_{\text{РЕЛЕ}} = U_{\Pi 1} - U_{\Pi 2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_1} \right) \frac{Z_{\text{РЕЛЕ}}}{Z_2}. \quad (11)$$

На высоких частотах сопротивление Z_1 мало и близко к сумме сопротивлений $Z_{\text{КАБ}}$ и Z_N ($Z_1 \approx Z_{\text{КАБ}} + Z_N$), а сопротивление $Z_2 \approx Z_{\text{РЕЛЕ}}$, поэтому $U_{\Pi 1} \approx U_C$, $U_{\text{ТН}} \approx 0$, а напряжения $U_{\Pi 2}$ и $U_{\text{РЕЛЕ}}$ зависят от соотношения сопротивлений Z_N и $Z_{\text{КАБ}}$:

$$U_{\Pi 2}^{\text{ВЧ}} \approx U_C \frac{Z_{\text{КАБ}}}{Z_{\text{КАБ}} + Z_N}; \quad U_{\text{РЕЛЕ}}^{\text{ВЧ}} = U_C \frac{Z_N}{Z_{\text{КАБ}} + Z_N}. \quad (12)$$

Если сопротивление $Z_{\text{КАБ}}$ значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, тогда $U_{\Pi 2} \approx U_C$, $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$. Если сопротивление $Z_{\text{КАБ}}$ значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением $Z_{\text{КАБ}}$ можно пренебречь, тогда $U_{\Pi 2} \approx 0$, $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx U_C$.

На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{\text{КАБ}}$ велико и напряжение U_C приложено к этой емкости, поэтому $U_{\Pi 1} \approx U_C$, $U_{\Pi 2} \approx U_C$, $U_{\text{ТН}} \approx 0$, $U_{\text{РЕЛЕ}} \approx 0$.

1.2. На рис. 1, б приведена схема, поясняющая возникновение помех в цепях напряжения при протекании больших токов по ЗУ для случая заземления цепей напряжения в релейной панели.

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C определяется по формуле (1), но с учетом того, что сопротивление цепей напряжения Z_1 определяется по формуле:

$$Z_1 = \frac{Z_N \cdot Z_2}{Z_N + Z_2} + Z_{\text{ТН2}}, \quad (13)$$

где Z_N – сопротивление нулевого провода кабеля; $Z_{\text{ТН2}}$ – емкостная составляющая сопротивления ТН; Z_2 – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле (3).

На высоких частотах сопротивление Z_2 близко к сопротивлению $Z_{\text{РЕЛЕ}}$, сопротивление Z_1 близко к сумме сопротивлений Z_N и $Z_{\text{КАБ}}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{\text{ЗУ}}$, следовательно, сопротивление Z_C близко к сопротивлению $Z_{\text{ЗУ}}$.

На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{\text{ТН2}}$ значительно больше

сопротивлений Z_N и Z_2 , поэтому сопротивлениями Z_N и Z_2 можно пренебречь, тогда сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТН2}$, но шунтировано меньшим сопротивлением $Z_{3У}$, следовательно, сопротивление Z_C по-прежнему близко к сопротивлению $Z_{3У}$.

Ток помехи I_5 , ответвляющийся с ЗУ в цепи напряжения, определяется по формуле (4), но с учетом формулы (13). Ток I_2 , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

Токи помехи в нулевом проводе I_3 и в реле I_4 :

$$I_3 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{ТН2}}{Z_N}; \quad (14)$$

$$I_4 = \frac{U_C - I_5 \cdot Z_{ТН2}}{Z_2}. \quad (15)$$

Напряжения помехи между фазным проводом и землей $U_{П1}$, между нулевым проводом и землей $U_{П2}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$:

$$U_{П1} = I_4 \cdot Z_{ТН1} + I_5 \cdot Z_{ТН2} = U_C \left[\frac{Z_{ТН2}}{Z_1} + \frac{Z_{ТН1}}{Z_2} \left(1 - \frac{Z_{ТН2}}{Z_1} \right) \right]; \quad (16)$$

$$U_{П2} = I_5 \cdot Z_{ТН2} = U_C \frac{Z_{ТН2}}{Z_1}; \quad (17)$$

$$U_{ТН} = U_{П1} - U_{П2} = U_C \left(1 - \frac{Z_{ТН2}}{Z_1} \right) \frac{Z_{ТН1}}{Z_2}; \quad (18)$$

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \left(1 - \frac{Z_{ТН2}}{Z_1} \right) \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2}. \quad (19)$$

На высоких частотах $Z_2 \approx Z_{РЕЛЕ}$, $Z_1 \approx Z_{ТН2} + Z_N$, поэтому $U_{ТН} \approx 0$, а напряжения $U_{П1}$, $U_{П2}$ и $U_{РЕЛЕ}$ зависят от соотношения сопротивлений Z_N и $Z_{КАБ}$:

$$U_{П1}^{ВЧ} \approx U_{П2}^{ВЧ} \approx U_C \frac{Z_{ТН2}}{Z_{ТН2} + Z_N}; \quad U_{РЕЛЕ}^{ВЧ} = U_C \frac{Z_N}{Z_{ТН2} + Z_N}. \quad (20)$$

Если сопротивление $Z_{ТН2}$ значительно больше сопротивления Z_N , то сопротивлением Z_N можно пренебречь, тогда $U_{П1} \approx U_{П2} \approx U_C$, $U_{РЕЛЕ} \approx 0$. Если сопротивление $Z_{ТН2}$ значительно меньше сопротивления Z_N , то сопротивлением $Z_{ТН2}$ можно пренебречь, тогда $U_{П1} \approx U_{П2} \approx 0$, $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$.

На низких частотах сопротивление $Z_{ТН2}$ велико и напряжение U_C приложено к этой емкости, поэтому $U_{П1} \approx U_C$, $U_{П2} \approx U_C$, $U_{ТН} \approx 0$, $U_{РЕЛЕ} \approx 0$.

Выводы по п. 1

В табл. 1 и 2 приведены высокочастотные и низкочастотные приближения напряжений помех $U_{ТН}$, $U_{П1}$, $U_{П2}$ и $U_{РЕЛЕ}$ в случае заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН – табл. 1, в случае заземления цепей напря-

жения в релейной панели – табл. 2. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы.

Параметры помех в цепях напряжения, как и в токовых цепях [5], на высоких и низких частотах определяются параметрами цепей и напряжением U_C . Напряжение U_C определяется частью воздействующего тока, которая ответвляется в эквивалентное сопротивление схемы Z_C . Поэтому, выполнив измерения напряжения U_C при имитации воздействующих токов в некотором масштабе по амплитуде, но с сохранением формы тока, и зная параметры цепей напряжения, можно определить параметры электромагнитных помех.

Высокочастотные и низкочастотные приближения позволяют выполнить оценку параметров помех «сверху». Погрешность оценки зависит от того, на сколько эквивалентное сопротивление схемы Z_C отличается от сопротивления связи Z_{3y} : чем меньше сопротивление Z_C отличается от сопротивления Z_{3y} , тем меньше погрешность оценки параметров помех.

Таблица 1 – Помехи в цепях напряжения, заземленных в клеммном ящике ТН

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{КАБ} \gg Z_N$	$Z_{КАБ} \ll Z_N$	
Ток помехи I_2	(5)	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$		$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$
Ток помехи I_3	(6)	$I_3 \approx U_C / Z_{КАБ}$	$I_3 \approx U_C / Z_N$	$I_3 \approx 0$
Ток помехи I_4	(7)	$I_4 \approx 0$	$I_4 \approx U_C / Z_{РЕЛЕ}$	$I_4 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(8)	$U_{П1} \approx U_C$		$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(9)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТН}$	(10)	$U_{ТН} \approx 0$		$U_{ТН} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(11)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Таблица 2 – Помехи в цепях напряжения, заземленных в релейной панели

Наименование параметра	Общая формула	ВЧ приближение		НЧ приближение
		$Z_{ТН2} \gg Z_N$	$Z_{ТН2} \ll Z_N$	
Ток помехи I_2	(5)	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$	$I_2 \approx U_C / Z_{БР}$
Ток помехи I_3	(14)	$I_3 \approx U_C / Z_{ТН2}$	$I_3 \approx U_C / Z_N$	$I_3 \approx 0$
Ток помехи I_4	(15)	$I_4 \approx 0$	$I_4 \approx U_C / Z_{РЕЛЕ}$	$I_4 \approx 0$
Напряжение помехи $U_{П1}$	(16)	$U_{П1} \approx U_C$	$U_{П1} \approx 0$	$U_{П1} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{П2}$	(17)	$U_{П2} \approx U_C$	$U_{П2} \approx 0$	$U_{П2} \approx U_C$
Напряжение помехи $U_{ТН}$	(18)	$U_{ТН} \approx 0$		$U_{ТН} \approx 0$
Напряжение помехи $U_{РЕЛЕ}$	(19)	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$

Сопротивление брони кабеля $Z_{БР}$ мало на низких частотах, поэтому ток помехи I_2 может оказывать термическое воздействие на изоляцию кабеля. На высоких частотах сопротивление брони кабеля $Z_{БР}$ значительно возрастает и ток помехи I_2 не оказывает существенного термического воздействия на изоляцию кабеля.

Сопротивление связи $Z_{3У}$ значительно меньше сопротивления цепей напряжения Z_1 на высоких и низких частотах. Следовательно, в эти цепи отводится не значительная часть воздействующего тока I_1 , поэтому токи помех I_3 и I_4 не оказывают существенного термического воздействия на проводники и изоляцию кабеля.

На низких частотах сопротивление связи $Z_{3У}$ мало, поэтому напряжение U_C , а значит и напряжения помех $U_{П1}$ и $U_{П2}$ могут достигать сотен вольт при КЗ на шинах ПС, но все же не представляют опасности для изоляции кабеля.

На высоких частотах индуктивная составляющая сопротивления ТН $Z_{ТН1}$ значительно меньше сопротивления реле $Z_{РЕЛЕ}$ (ТН работает в режиме, близком к режиму холостого хода), поэтому напряжение помехи на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ близко к нулю для любого варианта заземления цепей напряжения. На низких частотах напряжение U_C прикладывается к емкости ТН и кабеля, поэтому напряжения помех на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле напряжения $U_{РЕЛЕ}$ близки к нулю для любого варианта заземления цепей напряжения.

На высоких частотах существенно возрастает индуктивная составляющая сопротивления связи $Z_{3У}$, поэтому напряжение U_C , а значит и напряжения помех $U_{П1}$, $U_{П2}$ и $U_{РЕЛЕ}$ (в зависимости от соотношения сопротивлений $Z_{КАБ}$ и Z_N , $Z_{ТН2}$ и Z_N) могут достигать при ударе молнии нескольких десятков киловольт, следовательно, напряжения помех представляют опасность для изоляции кабеля. Напряжения помех $U_{П1}$ и $U_{П2}$ представляют опасность для изоляции с той стороны кабеля, где не выполняется заземление цепей напряжения.

Если напряжение помех превысит электрическую прочность изоляции, то произойдет КЗ в кабеле. Нормы испытаний не предусматривают испытание изоляции контрольных кабелей импульсными напряжениями. Поэтому целесообразно определить параметры помех для различных вариантов повреждения изоляции кабеля.

2 Помехи в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом кабеля

На рис. 2 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех $U_{П2}$ (см. п.1) между нулевым проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля.

Эквивалентное сопротивление схемы Z_C (для любого варианта заземления цепей напряжения) определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{3У} \cdot Z_{БР} \cdot Z_N \cdot Z_2}{Z_{3У} \cdot Z_{БР} \cdot (Z_N + Z_2) + Z_N \cdot Z_2 \cdot (Z_{3У} + Z_{БР})}, \quad (21)$$

где Z_2 – сопротивление фазного участка цепей напряжения, определяемое по формуле (3).

Напряжение помехи $U_{П2}$ в месте пробоя кабеля равно нулю ($U_{П2} = 0$).
 Ток I_2 , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).
 Ток помехи I_5 равен нулю, поскольку $Z_{ТН2}$ замкнуто.
 Токи помехи в нулевом проводе I_3 и в реле I_4 :

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_N}; \quad I_4 = \frac{U_C}{Z_2} \quad (22)$$

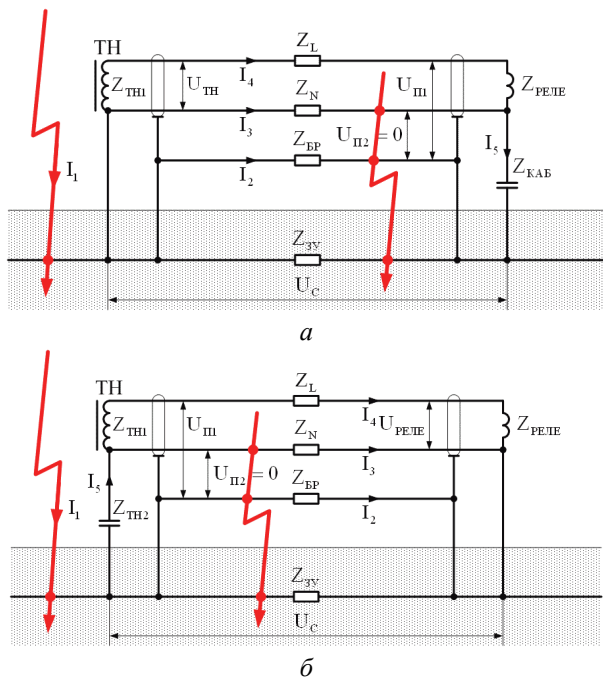


Рисунок 2 – Схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю нулевым проводом при протекании больших токов по ЗУ: а – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН
 б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

2.1. Напряжения помехи между фазным проводом и землей $U_{П1}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:

$$U_{П1} = U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_L + Z_{ТН1}}; \quad (23)$$

$$U_{ТН} = I_4 \cdot Z_{ТН1} = U_C \frac{Z_{ТН1}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_L + Z_{ТН1}}. \quad (24)$$

На низких частотах сопротивления $Z_{ТН1}$ и $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше со-

противления Z_L , при этом сопротивление $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше сопротивления $Z_{ТН1}$ поскольку ТН работает в режиме близком к режиму ХХ, поэтому $U_{П1} = U_{РЕЛЕ} \approx U_C$, $U_{ТН} \approx 0$.

2.2. Напряжения помехи между фазным проводом и землей $U_{П1}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ для случая заземления цепей напряжения в релейной панели:

$$U_{П1} = U_{ТН1} = I_4 \cdot Z_{ТН1} = U_C \frac{Z_{ТН1}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_L + Z_{ТН1}}; \quad (25)$$

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_L + Z_{ТН1}}. \quad (26)$$

На низких частотах $U_{П1} = U_{ТН} \approx 0$, $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$.

3 Помехи в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом кабеля

На рис. 3 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотное напряжение помех $U_{П1}$ (см. п.1) между фазным проводом и землей превысит предел электрической прочности изоляции кабеля.

Напряжение помехи $U_{П1}$ в месте пробоя кабеля равно нулю ($U_{П1} = 0$).

Ток I_2 , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

3.1. Эквивалентное сопротивление схемы Z_C для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} (Z_1 + Z_2) + Z_1 \cdot Z_2 \cdot (Z_{ЗУ} + Z_{БР})}. \quad (27)$$

где Z_1 и Z_2 – сопротивление нулевого и фазного участков цепей напряжения соответственно, определяемые по формулам:

$$Z_1 = Z_N + \frac{Z_{РЕЛЕ} \cdot Z_{КАБ}}{Z_{РЕЛЕ} + Z_{КАБ}}; \quad (28)$$

$$Z_2 = Z_L + Z_{ТН1}. \quad (29)$$

Токи помехи в нулевом I_3 и фазном I_4 проводах:

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_1}; \quad I_4 = \frac{U_C}{Z_2}. \quad (30)$$

Напряжения помехи между нулевым проводом и землей $U_{П2}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$:

$$U_{П2} = U_{РЕЛЕ} = U_C - I_3 \cdot Z_N = U_C \left(1 - \frac{Z_N}{Z_1} \right); \quad (31)$$

$$U_{TH} = I_4 \cdot Z_{TH1} = U_C \frac{Z_{TH1}}{Z_2}. \quad (32)$$

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$, которое значительно больше сопротивления Z_N , поэтому $U_{П2} = U_{РЕЛЕ} \approx U_C$. Сопротивление Z_2 близко к сопротивлению Z_{TH1} , поэтому $U_{TH} \approx U_C$.

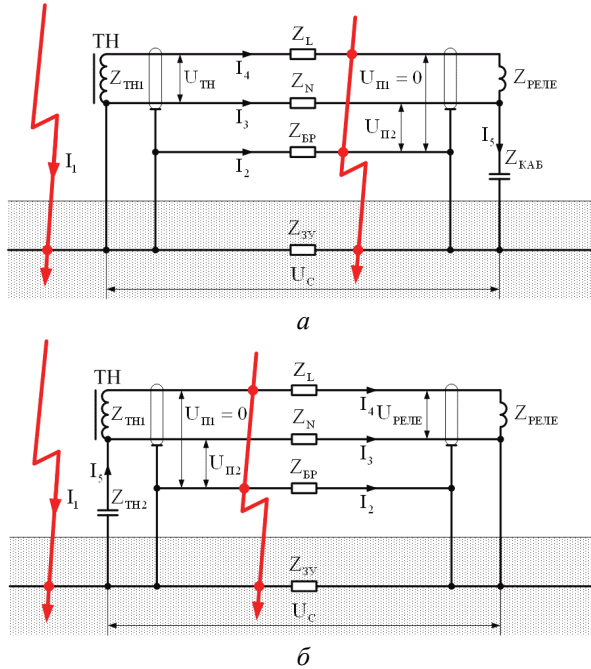


Рисунок 3 – схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ: *а* – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН

б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

3.2. Эквивалентное сопротивление схемы Z_C для случая заземления цепей напряжения в релейной панели определяется по формуле (27), сопротивление нулевого Z_1 и фазного Z_2 участков цепей напряжения определяются по формулам:

$$Z_1 = Z_N + \frac{Z_{TH1} \cdot Z_{TH2}}{Z_{TH1} + Z_{TH2}}; \quad (33)$$

$$Z_2 = Z_L + Z_{РЕЛЕ}. \quad (34)$$

Токи помехи в нулевом I_3 и фазном I_4 проводах определяются по формулам (30), но с учетом формул (33) и (34).

Напряжения помехи между нулевым проводом и землей $U_{П2}$, на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ и на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$:

$$U_{П2} = U_{ТН} = U_C - I_3 \cdot Z_N = U_C \left(1 - \frac{Z_N}{Z_1} \right); \quad (35)$$

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_2}. \quad (36)$$

На низких частотах сопротивление Z_1 близко к сопротивлению $Z_{ТН1}$, которое значительно больше сопротивления Z_N , поэтому $U_{П2} = U_{ТН} \approx U_C$. Сопротивление Z_2 на низких частотах близко к сопротивлению $Z_{РЕЛЕ}$, поэтому $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$.

4 Помехи в цепях напряжения с замкнутыми на землю фазным и нулевым проводами кабеля

На рис. 4 приведены схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ. Это возможно, когда высокочастотные напряжения помех $U_{П1}$ и $U_{П2}$ (см. п.1) превысят предел электрической прочности изоляции кабеля.

Напряжения помехи $U_{П1}$ и $U_{П2}$ в месте пробоя кабеля равны нулю.

Ток I_2 , протекающий по броне кабеля, определяется по формуле (5).

Ток I_3 , протекающий по нулевому проводу:

$$I_3 = \frac{U_C}{Z_N}. \quad (37)$$

4.1. Эквивалентное сопротивление схемы Z_C для случая заземления цепей напряжения в клеммном ящике ТН:

$$Z_C = \frac{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} \cdot Z_2 \cdot Z_N}{Z_{ЗУ} \cdot Z_{БР} (Z_2 + Z_N) + Z_2 \cdot Z_N \cdot (Z_{ЗУ} + Z_{БР})}. \quad (38)$$

где Z_2 – сопротивление фазного участка цепей напряжения:

$$Z_2 = Z_L + Z_{ТН1}. \quad (39)$$

Ток I_4 , протекающий по фазному проводу:

$$I_4 = \frac{U_C}{Z_2}. \quad (40)$$

Напряжение на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ равно нулю ($U_{РЕЛЕ} = 0$).

Напряжение на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$:

$$U_{ТН} = I_4 \cdot Z_{ТН1} = U_C \frac{Z_{ТН1}}{Z_L + Z_{ТН1}}. \quad (41)$$

На низких частотах сопротивление $Z_{ТН1}$ значительно больше сопротивления Z_L , поэтому $U_{ТН} \approx U_C$.

4.2. Эквивалентное сопротивление схемы Z_C для случая заземления цепей напряжения в релейной панели определяется по формуле (38), но с учетом того, что сопротивление фазного участка цепей напряжения Z_2 определяется по формуле:

$$Z_2 = Z_L + Z_{РЕЛЕ} \quad (42)$$

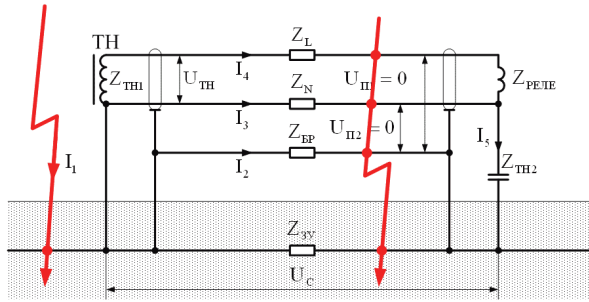
Ток I_4 , протекающий по фазному проводу определяется по формуле (40), но с учетом формулы (42).

Напряжение на клеммах вторичной обмотки ТН $U_{ТН}$ равно нулю.

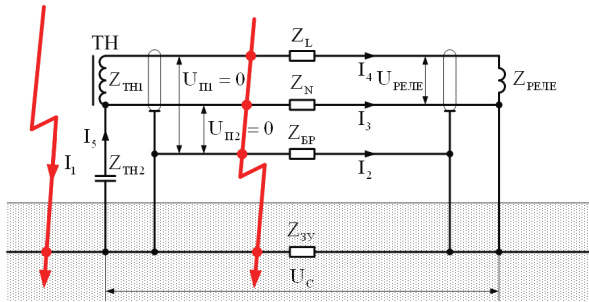
Напряжение на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$:

$$U_{РЕЛЕ} = I_4 \cdot Z_{РЕЛЕ} = U_C \frac{Z_{РЕЛЕ}}{Z_L + Z_{РЕЛЕ}} \quad (43)$$

На низких частотах сопротивление $Z_{РЕЛЕ}$ значительно больше сопротивления Z_L , поэтому $U_{РЕЛЕ} \approx U_C$.



a



б

Рисунок 4 – Схемы, поясняющие возникновение помех в цепях напряжения с замкнутым на землю фазным проводом при протекании больших токов по ЗУ: *a* – цепи напряжения заземлены в клеммном ящике ТН

б – цепи напряжения заземлены в релейной панели

Выводы по пп. 2-4. В табл. 3 приведены низкочастотные приближения напряжений и токов помех в цепях напряжения для различных вариантов за-

мыкания в кабеле. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 3, позволяет сделать следующие выводы.

При замыкании на землю только нулевого провода кабеля (см. рис. 2) независимо от места заземления цепей напряжения, напряжение помехи на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ может вызвать срабатывание реле. Ток, протекающий по нулевому проводнику I_3 , может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, а ток, протекающий по фазному проводнику I_4 , не может вызвать обрыв фазного провода и/или термическое повреждение его изоляции.

При замыкании на землю только фазного провода кабеля (см. рис. 3) независимо от места заземления цепей напряжения, напряжение помехи на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ может вызвать срабатывание реле. Токи, протекающие по нулевому I_3 и фазному I_4 проводникам не могут вызвать обрыв проводников и/или термическое повреждение их изоляции.

Таблица 3 – Токи помех в токовых цепях с замкнутыми проводами кабеля

Схема		НЧ приближение			
		$U_{ТН}$	$U_{РЕЛЕ}$	I_3	I_4
Замкнут на землю нулевой провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 2, а)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 2, б)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
Замкнут на землю фазный провод	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 3, а)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 3, б)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$
Замкнуты на землю два провода	цепи заземлены в клеммном ящике ТН (см. рис. 4, а)	$U_{ТН} \approx U_C$	$U_{РЕЛЕ} \approx 0$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{ТН1}}$
	цепи заземлены в релейной панели (см. рис. 4, б)	$U_{ТН} \approx 0$	$U_{РЕЛЕ} \approx U_C$	$I_3 \approx \frac{U_C}{Z_N}$	$I_4 \approx \frac{U_C}{Z_{РЕЛЕ}}$

При замыкании на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 4) независимо от места заземления цепей напряжения, ток помехи I_3 может вызвать обрыв нулевого провода и/или термическое повреждение его изоляции, а ток помехи I_4 не может вызвать обрыв фазного провода и/или термическое повреждение его изоляции. Напряжение помехи на клеммах реле $U_{РЕЛЕ}$ может вызвать срабатывание реле только в случае заземления цепей

напряжения в релейной панели.

Замыкание на землю нулевого и фазного проводов кабеля (см. рис. 4) подобно установке УЗИП (например, варисторов) на той стороне кабеля, где не заземляются цепи напряжения. Однако, при срабатывании таких устройств следует ограничить токи помех, протекающие по нулевому проводу, поскольку ток, протекающий по нулевому проводу, может вызвать обрыв этого провода.

Для определения параметров электромагнитных помех в кабелях ТН при КЗ на шинах ПС необходимо при имитации КЗ на действующем объекте без вывода из работы устройств релейной защиты экспериментально измерить напряжение U_C между заземляющим проводником ТН и корпусом релейной панели, к которому подключен исследуемый кабель.

Анализ полученных выражений показывает, что чем меньше сопротивление связи Z_{3y} между заземляющим проводником ТН и корпусом релейной панели, тем меньше напряжения и токи помехи. Поэтому для уменьшения уровня помех во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения следует уменьшать сопротивление связи.

Список литературы: 1. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость: пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора : 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.П. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1998. 2. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с. 3. Вавин В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи: изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. 4. С.И. Лезнов, А.Л. Фаерман. Устройство и обслуживание вторичных цепей электроустановок / Под ред. М.Д. Кучкина. – М.: Энергия, 1979. 5. Воронина З.А., Глебов О.Ю., Колиушко Г.М. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов тока при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – Вып. 16. – 2011. – С. 44-59.

Поступила в редколлегию 20.03.2012.