

З.А.ВОРОНИНА, зав. отд., НТУ «ХПИ»;
О.Ю.ГЛЕБОВ, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
В.О.ЕРЕМЕЕВ, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В КАБЕЛЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ 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 високочастотного зв'язку при короткому замиканні на шинах підстанцій високої напруги з метою забезпечення електромагнітної сумісності на енергетичних об'єктах.

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

Введение. Короткое замыкание (КЗ) на шинах подстанции является одним из наиболее мощных источников электромагнитных помех для всех вторичных цепей, в том числе и для цепей высокочастотной (ВЧ) связи. КЗ вызывает переходные процессы в электрической сети, которые сопровождаются протеканием токов по заземляющему устройству подстанции (от 10 кА до 50 кА в электрических сетях с заземленной нейтралью). При этом ток КЗ имеет как низкочастотную (НЧ) составляющую промышленной частоты 50 Гц, так и ВЧ составляющую, лежащую в диапазоне частот от 50 кГц до 1 МГц. Наряду с КЗ, также одним из наиболее мощных источников электромагнитных помех для всех вторичных цепей является прямой удар молнии, который вызывает переходные процессы, сопровождаемые протеканием по заземляющему устройству подстанции импульсных токов амплитудой до 200 кА в диапазоне частот от 30 кГц до 150 кГц.

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) должны быть известны [1]: электромагнитная обстановка (ЭМО), которая характеризуется амплитудными значениями напряжений и токов источника помех, напряженностями поля, частотными спектрами, крутизной фронтов; механизм связи, который характеризуется коэффициентами затухания или передаточными функциями; чувствительность приемника помех, которая характеризуется пороговыми значениями помех в частотной и временной областях.

Различают следующие механизмы связи электромагнитных воздействий [2]: гальваническая связь (через проводники); связь через электрическое поле (через емкости); связь через магнитной поле (через индуктивности); связь через излучение. Подобное разделение механизмов связи является весьма условным, поскольку в реальных электрических цепях два и более механизма

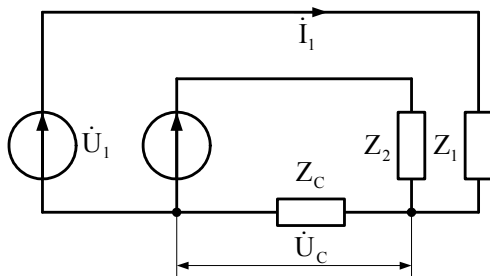
проявляются одновременно, но для анализа процессов данное разделение механизмов связи является достаточно удобным.

Общие положения. При КЗ на шинах подстанции (ПС) вторичные цепи ВЧ связи оказываются гальванически связанными с первичными (высоковольтными) цепями подстанции. Поэтому в настоящей статье рассматривается только гальваническая связь.

Гальваническая связь возникает, если некоторое полное сопротивление оказывается общим для двух или нескольких контуров. При сравнимых мощностях источников энергии обоих контуров, ток второго контура может вызывать помеху в первом контуре. Однако на энергообъектах мощность источника энергии первого контура значительно превышает мощность источника энергии второго контура. Поэтому влиянием второго контура на первый можно пренебречь. К тому же, для решения задач по обеспечению ЭМС на энергообъектах, влияние второго контура на первый не представляет практического интереса и поэтому далее не рассматривается.

Гальваническая связь между первичными и вторичными цепями энергообъектов возникает также и в случае срабатывания разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН). В случае КЗ на шинах влияющим воздействием является ток замыкания, в случае срабатывания разрядников или ОПН – ток, протекающий через эти элементы, в случае прямого удара молнии влияющим воздействием является ток молнии.

На рис. 1 приведена эквивалентная схема гальванической связи, поясняющая механизм взаимного влияния первого и второго контура.



U_1 – напряжение источника первого контура; I_1 – ток в первом контуре; U_{II} – напряжение помехи во втором контуре; I_{II} – ток помехи во втором контуре; Z_1 – полное сопротивление нагрузки первого контура; Z_2 – полное сопротивление нагрузки второго контура; Z_C – полное сопротивление связи; U_C – напряжение на сопротивлении связи

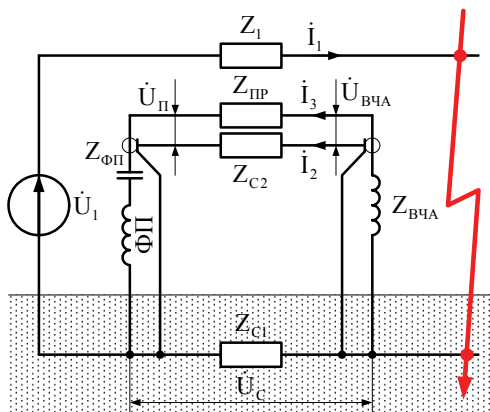
Рисунок 1 – Эквивалентная схема гальванической связи

Ток I_1 в первом контуре создает на общем сопротивлении Z_C (сопротивление связи) падение напряжения U_C :

$$\dot{U}_C = \dot{I}_1 \cdot Z_C = \dot{U}_1 \cdot \frac{Z_C}{Z_1 + Z_C} = \dot{U}_1 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_C} \right). \quad (1)$$

Напряжение U_C во втором контуре накладывается на полезный сигнал в виде напряжения помехи общего вида.

Помехи в кабеле ВЧ связи при КЗ на шинах ПС. На рис. 2 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.



U_1 – напряжение источника помех; I_1 – ток КЗ в первом контуре; Z_1 – сопротивление первого контура; Z_{C1} – сопротивление горизонтального заземлителя между точками заземления экрана РК кабеля (сопротивление заземлителя); Z_{C2} – сопротивление заземленного с двух сторон экрана РК кабеля (сопротивление экрана); $Z_{ПР}$ – сопротивление жилы РК кабеля (сопротивление жилы); $Z_{ВЧА}$ – сопротивление входного фильтра ВЧ аппаратуры (сопротивление ВЧА); $Z_{ФП}$ – сопротивление фильтра присоединения (сопротивление ФП); $U_П$ – напряжение помехи; $U_{ВЧА}$ – напряжение на входе ВЧ аппаратуры

Рисунок 2

Сопротивление второго контура Z_2 состоит из трех последовательно соединенных участков $Z_{ПР}$, $Z_{ВЧА}$ и $Z_{ФП}$:

$$Z_2 = Z_{ПР} + Z_{ВЧА} + Z_{ФП}. \quad (2)$$

Сопротивление связи Z_C состоит из трех параллельно соединенных участков Z_{C1} , Z_{C2} и Z_2 :

$$Z_C = \frac{Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_2}{Z_{C1} \cdot Z_{C2} + Z_2 (Z_{C1} + Z_{C2})}. \quad (3)$$

Напряжение U_C определяется током КЗ I_1 и сопротивлением связи Z_C по формуле (1) с учетом формулы (3). Ток I_3 , который протекает через ВЧ аппаратуру определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению Z_2 .

Напряжение $U_П$ помехи определяется током I_3 и сопротивлением $Z_{ФП}$:

$$\dot{U}_{\Pi} = \dot{I}_3 \cdot Z_{\Phi\Pi} = \dot{U}_C \frac{Z_{\Phi\Pi}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{\Phi\Pi}}{Z_{\Pi P} + Z_{BЧA} + Z_{\Phi\Pi}}. \quad (4)$$

На высоких частотах напряжение U_{Π} зависит от соотношения индуктивных сопротивлений $Z_{BЧA}$ и $Z_{\Phi\Pi}$. Если $Z_{\Phi\Pi} \gg Z_{BЧA}$, то $U_{\Pi} \approx U_C$. Если $Z_{\Phi\Pi} \ll Z_{BЧA}$, то $U_{\Pi} \approx 0$. На низких частотах емкостная составляющая $Z_{\Phi\Pi}$ значительно больше чем $Z_{BЧA}$ и $Z_{\Pi P}$, поэтому $U_{\Pi} \approx U_C$.

Напряжение $U_{BЧA}$ на входе ВЧ аппаратуры определяется током I_3 и сопротивлением $Z_{BЧA}$:

$$\dot{U}_{BЧA} = \dot{I}_3 \cdot Z_{BЧA} = \dot{U}_C \frac{Z_{BЧA}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{BЧA}}{Z_{\Pi P} + Z_{BЧA} + Z_{\Phi\Pi}}. \quad (5)$$

На высоких частотах напряжение $U_{BЧA}$ зависит от соотношения индуктивных сопротивлений $Z_{BЧA}$ и $Z_{\Phi\Pi}$. Если $Z_{\Phi\Pi} \gg Z_{BЧA}$, то $U_{BЧA} \approx 0$. Если $Z_{\Phi\Pi} \ll Z_{BЧA}$, то $U_{BЧA} \approx U_C$. На низких частотах емкостная составляющая $Z_{\Phi\Pi}$ значительно больше чем $Z_{BЧA}$ и $Z_{\Pi P}$, поэтому $U_{BЧA} \approx 0$.

Ток I_2 , протекающий по экрану и оказывающий термическое воздействие на изоляцию РК кабеля, определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению экрана Z_{C2} .

Если напряжение помехи U_{Π} превысит электрическую прочность изоляции РК кабеля или ток I_2 вызовет расплавление этой изоляции, то произойдет КЗ в РК кабеле, как показано на рис. 3. Кроме КЗ в РК кабеле возможен также обрыв экрана или жилы кабеля.

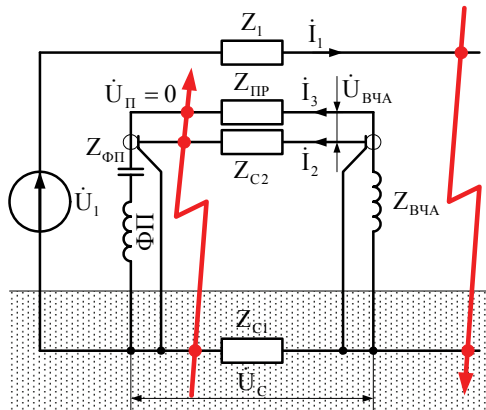


Рисунок 3

Помехи в замкнутом кабеле ВЧ связи при КЗ на шинах ПС. На рис. 3 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.

Сопротивление второго контура Z_2 состоит из двух последовательно соединенных участков $Z_{\Pi P}$ и $Z_{BЧA}$:

$$Z_2 = Z_{\Pi P} + Z_{BЧA}. \quad (6)$$

Сопrotивление связи Z_C определяется по формуле (3) с учетом (6). Напряжение U_C определяется по формуле (1) с учетом (6). Напряжение в месте пробоя РК кабеля равно нулю $U_{\Pi} = 0$. Ток I_3 , который протекает через ВЧ аппаратуру, определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению Z_2 .

Напряжение $U_{ВЧ\Delta}$ определяется током I_3 и сопротивлением $Z_{ВЧ\Delta}$:

$$\dot{U}_{ВЧ\Delta} = \dot{I}_3 \cdot Z_{ВЧ\Delta} = \dot{U}_C \frac{Z_{ВЧ\Delta}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{ВЧ\Delta}}{Z_{ПР} + Z_{ВЧ\Delta}}. \quad (7)$$

На высоких частотах сопротивление $Z_{ВЧ\Delta}$ велико, поэтому $U_{ВЧ\Delta} \approx U_C$. На низких частотах напряжение $U_{ВЧ\Delta}$ определяется соотношением сопротивлений $Z_{ВЧ\Delta}$ и $Z_{ПР}$. Если $Z_{ВЧ\Delta} \gg Z_{ПР}$, то $U_{ВЧ\Delta} \approx U_C$. Если $Z_{ВЧ\Delta} \ll Z_{ПР}$, то $U_{ВЧ\Delta} \approx 0$.

Помехи в кабеле ВЧ связи с оборванным возле ФП экраном при КЗ на шинах ПС. На рис. 4 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.

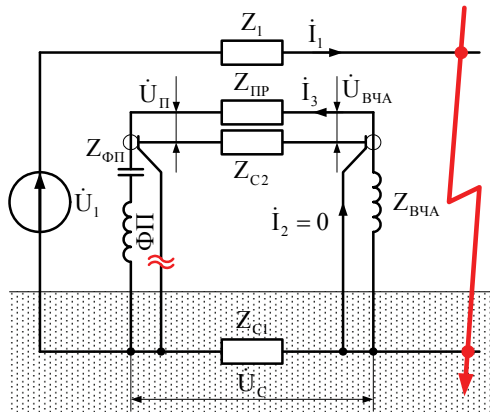


Рисунок 4

Сопротивление Z_2 определяется по формуле (2).

Сопротивление Z_C связи состоит из двух параллельно соединенных участков Z_{C1} и Z_2 :

$$Z_C = \frac{Z_{C1} \cdot Z_2}{Z_{C1} + Z_2}. \quad (8)$$

Напряжение U_C определяется по формуле (1) с учетом (8). Ток I_3 , который протекает через ВЧ аппаратуру, определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению Z_2 .

Напряжение U_{Π} определяется током I_3 и последовательно соединенными сопротивлениями $Z_{ПР}$ и $Z_{ВЧ\Delta}$:

$$\dot{U}_{\Pi} = \dot{I}_3(Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА}) = \dot{U}_C \frac{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА}}{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА} + Z_{ФП}}. \quad (9)$$

Напряжение $U_{ВЧА}$ определяется током I_3 и сопротивлением $Z_{ВЧА}$:

$$\dot{U}_{ВЧА} = \dot{I}_3 \cdot Z_{ВЧА} = \dot{U}_C \frac{Z_{ВЧА}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{ВЧА}}{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА} + Z_{ФП}}. \quad (10)$$

На высоких частотах напряжения U_{Π} и $U_{ВЧА}$ зависят от соотношения индуктивных сопротивлений $Z_{ВЧА}$ и $Z_{ФП}$. Если $Z_{ФП} \gg Z_{ВЧА}$, то $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx 0$. Если $Z_{ФП} \ll Z_{ВЧА}$, то $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx U_C$. На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{ФП}$ велико и напряжение U_C приложено к нему, поэтому $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx 0$.

Помехи в кабеле ВЧ связи с оборванным возле ВЧ аппаратуры экраном при КЗ на шинах ПС. На рис. 5 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.

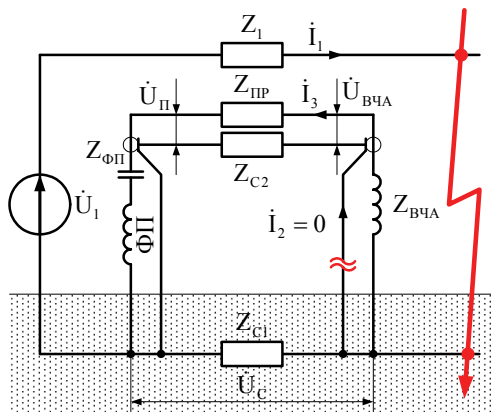


Рисунок 5

Сопротивление Z_2 второго контура определяется по формуле (2). Сопротивление Z_C связи определяется по формуле (8). Напряжение U_C определяется по формуле (1) с учетом (2) и (8). Ток I_3 определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению Z_2 .

Напряжение U_{Π} определяется током I_3 и сопротивлением $Z_{ФП}$:

$$\dot{U}_{\Pi} = \dot{I}_3 \cdot Z_{ФП} = \dot{U}_C \frac{Z_{ФП}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{ФП}}{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА} + Z_{ФП}}. \quad (11)$$

Напряжение $U_{ВЧА}$ определяется током I_3 и последовательно соединенными сопротивлениями $Z_{\Pi\Pi}$ и $Z_{ФП}$:

$$\dot{U}_{ВЧА} = \dot{I}_3(Z_{ФП} + Z_{\Pi\Pi}) = \dot{U}_C \frac{Z_{ФП} + Z_{\Pi\Pi}}{Z_2} = \dot{U}_C \frac{Z_{ФП} + Z_{\Pi\Pi}}{Z_{\Pi\Pi} + Z_{ВЧА} + Z_{ФП}}. \quad (12)$$

На высоких частотах напряжения U_{Π} и $U_{ВЧА}$ зависят от соотношения индуктивных сопротивлений $Z_{ВЧА}$ и $Z_{ФП}$. Если $Z_{ФП} \gg Z_{ВЧА}$, то $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx U_C$. Если $Z_{ФП} \ll Z_{ВЧА}$, то $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx 0$. На низких частотах емкостное сопротивление $Z_{ФП}$ велико и напряжение U_C приложено к нему, поэтому $U_{\Pi} \approx U_{ВЧА} \approx U_C$.

Помехи в кабеле ВЧ связи с отсоединенной от ВЧ аппаратуры жилой при КЗ на шинах ПС. На рис. 6 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.

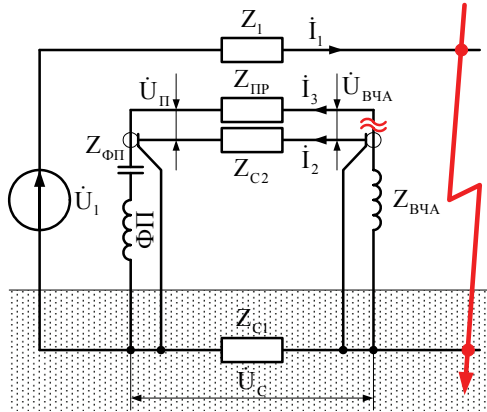


Рисунок 6

Сопротивление Z_C связи определяется по формуле:

$$Z_C = \frac{Z_{C1} \cdot Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}}. \quad (13)$$

Напряжение U_C определяется по формуле (1) с учетом (13). Ток I_2 , протекающий по экрану и оказывающий термическое воздействие на изоляцию РК кабеля, определяется отношением напряжения U_C к сопротивлению экран Z_{C2} . Ток $I_3 = 0$, поэтому напряжение помехи $U_{\Pi} = 0$, а напряжение на выходе кабеля $U_{ВЧА} = U_C$.

Помехи в кабеле ВЧ связи с отсоединенной от ФП жилой при КЗ на шинах ПС. На рис. 7 приведена схема, поясняющая возникновение помех в данном случае.

Сопротивление Z_C связи определяется по формуле (13). Напряжение U_C определяется по формуле (1) с учетом (13). Ток $I_3 = 0$, поэтому напряжение помехи $U_{\Pi} = U_C$, а напряжение $U_{ВЧА} = 0$.

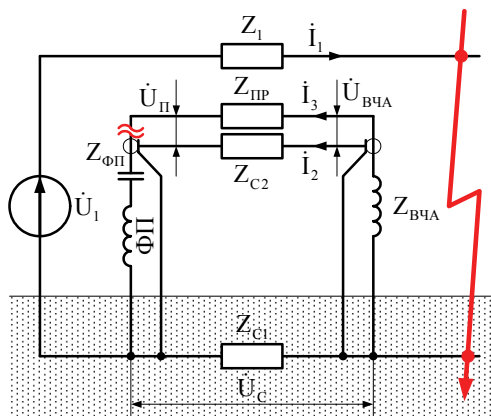


Рисунок 7

Выводы. В работе получены математические выражения, позволяющие определить параметры электромагнитных помех в кабелях ВЧ связи при коротком замыкании на шинах подстанции. Для этого необходимо знать параметры элементов ВЧ тракта, а также экспериментально измерить напряжение U_C между точками заземления экрана РК кабеля при имитации КЗ или удара молнии на действующем объекте без вывода из работы ВЧ аппаратуры.

Анализ полученных выражений показывает, что чем меньше сопротивление связи, тем меньше напряжение и ток помехи. Поэтому для уменьшения уровня помех в кабеле ВЧ связи следует уменьшать сопротивление связи, в частности сопротивление горизонтального заземлителя между точками заземления экрана РК кабеля.

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.

Поступила в редколлегию 15.03.2010