

Электромагнитные влияния между цепями кабелей связи

Цени и тракты направляющих систем (НС) постоянно находятся под воздействием сторонних электромагнитных полей того или иного происхождения. Различают две основные группы источников сторонних полей: внешние энергетически и конструктивно не связанные с НС и внутренние — соседние физические и искусственные цепи данной НС.

Внешние источники помех по своему происхождению делятся на естественные — грозовые разряды, солнечная радиация, космическое излучение, магнитные бури — и созданные человеком — высоковольтные ЛЭП, радиостанции различного назначения, линии электрифицированных железных дорог, метро и трамвая, электрические сети промышленных предприятий и отдельных энергоемких устройств.

Сторонние электромагнитные поля индуцируют в цепях и трактах НС помехи, которые не только снижают качество передачи, но иногда возбуждают большие напряжения и токи, приводящие к разрушению НС и аппаратуры, а также создающие опасность для жизни и здоровья эксплуатационного персонала. Поэтому для оценки свойств помимо изучения законов передачи сигналов необходимо также исследование процессов, связанных с воздействием сторонних электромагнитных полей на НС и методы защиты. Указанные воздействия называют *электромагнитными влияниями* или просто *влияниями на цепи* НС.

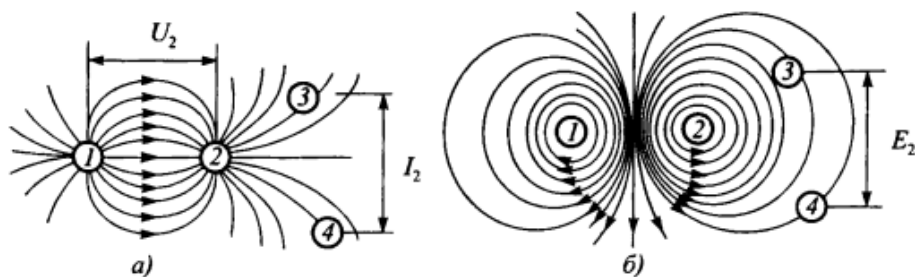
Данная проблема является общей для всех систем и устройств, связанных с генерацией, передачей, приемом и обработкой электрических сигналов, и называется проблемой электромагнитной совместимости.

Рассмотрим природу влияний между симметричными цепями кабеля на примере двух цепей, поперечный разрез которых показан на рис.

Допустим, что по цепи, образованной жилами 1 и 2, протекает переменный ток. Под действием этого тока вокруг цепи 1-2 создается переменное электромагнитное поле, которое может быть представлено в виде суммарного действия электрического и магнитного полей. Под действием электрического поля цепи 1-2 на жилах 3 и 4 возникают электрические заряды, которые вследствие различия расстояния между жилами 1, 2 и 3, 4 будут разной величины. Индуцированные заряды создают между жилами 3, 4 разность потенциалов, под действием которой в цепи 3-4 протекает ток. Наведенный ток достигает приемника, включенного на конце цепи, и создает мешающее влияние. Влияние, обусловленное действием электрического поля, называют *электрическим влиянием*.

Одновременно с электрическим влиянием между цепями действует и магнитное влияние. При прохождении переменного тока по цепи 1-2 вокруг нее создается переменное магнитное поле, в котором расположены жилы цепи 3-4. В результате магнитной индукции в жилах 3 и 4 наводится ЭДС, которая и создает ток в цепи 3-4. Этот ток достигает приемника, включенного на конце цепи, и оказывает мешающее действие. Влияние, обусловленное действием магнитного поля, называют *магнитным влиянием*.

Чем выше частота передаваемого тока по цепи, тем быстрее протекает процесс изменения электрического и магнитного полей и тем больше величины наведенных ЭДС и токов в соседних цепях.



Цепь, являющаяся источником электромагнитного поля, называется *влияющей*, а цепь, в которой возникают токи и напряжения помех, — *подверженной влиянию*. Количественной характеристикой электрического и магнитного влияний являются электрические и магнитные связи.

Электрическая связь на участке dx , отстоящем на расстоянии от начала цепи, определяется отношением приращения наведенного тока в цепи, подверженной влиянию, к напряжению во влияющей цепи:

Магнитная связь на участке dx , отстоящем на расстоянии x от начала цепи, определяется отношением приращения ЭДС в цепи, подверженной влиянию, к току во влияющей цепи с обратным знаком:

Отсюда следует, что электрическая связь имеет размерность проводимости См/км, а магнитная — размерность сопротивления Ом/км.

Соотношения между электрическими и магнитными связями, их активными и реактивными составляющими могут быть различными в зависимости от типа цепей, диапазона передаваемых частот и ряда других факторов.

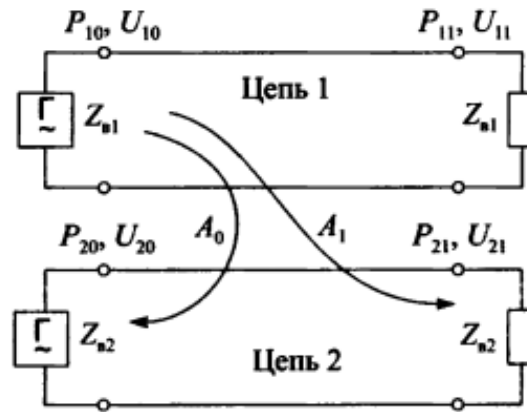
В области низких частот (ниже 10 кГц) определяющими является емкостные связи, на высоких частотах (более 100 кГц) влияния между цепями обусловлены как емкостными, так и магнитными связями. Величины магнитных и электрических связей между взаимовлияющими цепями зависят от взаимного расположения жил цепей относительно друг друга, оболочки и других цепей, а также от электрических характеристик диэлектрика, геометрических размеров жил и т.д.

Электромагнитные связи, вызывающие влияние между цепями, подразделяют на регулярные и нерегулярные. *Регулярные связи* определяются номинальными геометрическими размерами кабельных жил, номинальными расстояниями между ними и оболочкой при условии идеального выполнения всех элементов конструкции кабеля. *Нерегулярные связи* обусловлены неизбежным отклонением конструкции кабеля от идеально симметричной (смещение жил в поперечном сечении кабеля, неравенство шагов скрутки и т.д.) и зависят от множества случайных факторов, зачастую не поддающихся точному учету. По названию электромагнитных связей влияния между цепями подразделяются на *регулярные* и *нерегулярные*.

В технике связи электромагнитное влияние между цепями принято выражать величинами переходных затуханий. Переходные затухания

характеризуют степень уменьшения токов влияния при переходе из первой цепи во вторую.

В теории влияния конец цепи, на котором во влияющую цепь включен генератор (источник сигнала), называют *ближним*. Противоположный конец линии называют *дальним*. Соответственно рассматривают и два вида влияния: на ближнем и дальнем концах. Переходные затухания по мощности на ближнем конце A_0 и дальнем конце A_l определяются в децибелах:

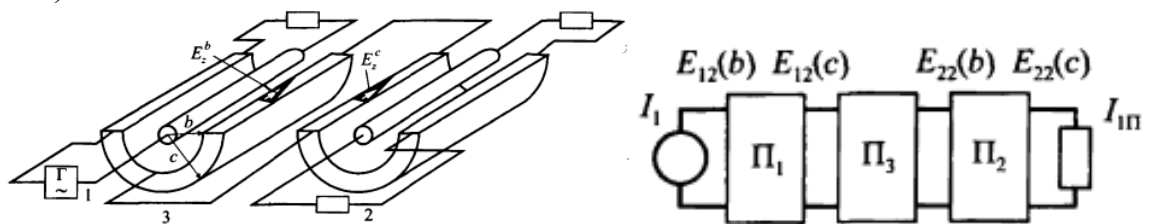


$$A_0 = 10 \lg \left| \frac{P_{10}}{P_{20}} \right|, \quad A_l = 10 \lg \left| \frac{P_{10}}{P_{2l}} \right|$$

где P_{10} — мощность сигнала на ближнем конце влияющей цепи; P_{20} , P_{2l} — мощности помех соответственно на ближнем и дальнем концах цепи, подверженной влиянию.

Как известно, электромагнитное поле коаксиальных цепей является закрытым, т.е. вне коаксиального кабеля оно не существует, что приводит к отсутствию непосредственных влияний между коаксиальными цепями.

Взаимные влияния между коаксиальными цепями обусловлены продольной составляющей напряженности электрического поля E_z на внешней поверхности внешнего проводника влияющей коаксиальной цепи (см. рис.).



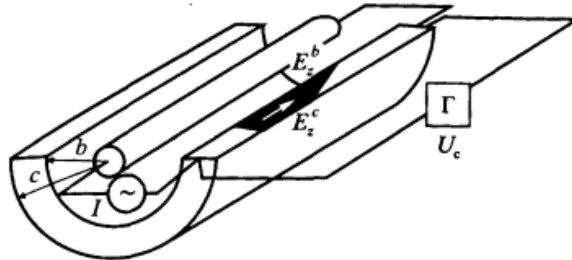
Эта составляющая поля возникает следующим образом. Протекающий по внешнему проводнику влияющей коаксиальной пары (цепь 1) ток $I_{вл}$ создает на внутренней поверхности внешнего проводника продольную составляющую напряженности поля E_z^b . Данная составляющая и составляющая магнитного поля H_ϕ определяют вектор Пойнтинга электромагнитного поля, направленный внутрь внешнего проводника коаксиальной цепи. Значение E_z^b вследствие явления поверхностного эффекта убывает с ростом r , т.е. по мере проникновения электромагнитной волны вглубь проводника.

В результате E_z^c на внешней поверхности внешнего проводника имеет минимальное значение. В соответствии с изменением $E_z(r)$ изменяется и плотность тока $J(r) = \sigma E_z(r)$, где σ — проводимость проводника.

Напряженность поля E_z^c , действуя в цепи 3, образованной внешними проводниками цепей 1 и 2, вызывает ток на внутренней поверхности внешнего проводника второй коаксиальной пары, подверженной влиянию. В результате из двух внешних проводников кабелей создается промежуточная цепь тока с эквивалентным сопротивлением, равным сумме продольных сопротивлений 1 и 2 внешних проводников и сопротивления третьей (промежуточной) цепи. В этой промежуточной цепи действует ЭДС, равная E_z на внешней поверхности внешнего проводника влияющей цепи (см. рис.).

Таким образом, в коаксиальных кабелях влияющая цепь 1 создает напряжение и ток в цепи 3, которая в свою очередь становится влияющей по отношению к цепи 2 и вызывает в ней ток помехи, убывающий с ростом частоты. В симметричных кабелях влияние растет с увеличением частоты.

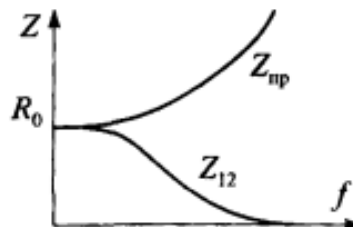
Степень взаимосвязи между коаксиальными цепями 1 и 2 характеризуется *сопротивлением связи* или *взаимным сопротивлением* $Z_{12}(\omega)$, представляющим собой отношение напряжения $U_c(\omega)$, возбуждаемого на внешней поверхности внешнего проводника влияющей коаксиальной цепи (см. след.рис.), к току $I_{1c}(\omega)$, протекающему в этой цепи.



Значение $U_c(\omega)$ численно равно $E_z^c(\omega)$, поэтому

$$Z_{12}(\omega) = U_c(\omega)/I_1(\omega) = E_z^c(\omega)/I_1(\omega).$$

Характер частотной зависимости сопротивления Z_{12} показан на след. рис.



С увеличением частоты величина Z_{12} падает вследствие возрастания потерь энергии электромагнитного поля при прохождении от внутренней поверхности внешнего проводника ($r=b$) до внешней его поверхности ($r=c$). На этом же рисунке показан характер изменения полного продольного сопротивления внешнего проводника $Z_{нр}$. Из рисунка видно, что при постоянном токе $Z_{12} = Z_{нр}$ и равны сопротивлению постоянного тока R_0 . С ростом частоты сопротивление $Z_{нр}$ вследствие поверхностного эффекта возрастает. Сопротивление связи можно рассчитать по формуле

$$Z_{12}(\omega) = \left| \frac{\sqrt{ik}}{2\pi\sqrt{bc}} \frac{1}{\sigma \operatorname{sh} kt\sqrt{i}} \right| \quad \text{или} \quad Z_{12}(\omega) = \frac{10^6}{2\pi\sqrt{bc}} |N|$$

где $k = \sqrt{\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов; b и c — внутренний и внешний радиусы внешнего проводника, мм; t — толщина внешнего проводника, мм; σ — проводимость материала проводника; $N = k\sqrt{i}/\sigma \operatorname{sh}(kt\sqrt{i})$.

Значения $|N|$, необходимые для расчета сопротивления связи $Z_{12}(\omega)$, приведены в табл.

Частота, кГц	Значения $ N $, Ом/км, при толщине внешнего проводника, мм									
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
	Медь					Алюминий				
200	175	114	81	56	44	293,9	194,3	144,7	111,4	87,5
300	174	110	73	50	34	293,2	193,2	139,8	104,1	77,7
500	168	99	59	35	19	292,2	187,5	128,1	87,4	58,6

На основании этого соотношения можно получить уравнение для первичного параметра влияния между коаксиальными цепями:

$$M_{\text{кк}} = \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_3} = \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11} + Z_{22} + i\omega L_3},$$

где Z_{12} и Z_{21} — сопротивления связи влияющей цепи и цепи, подверженной влиянию, соответственно; $Z_3 = Z_{11} + Z_{22} + i\omega L_3$ — полное продольное сопротивление третьей цепи; Z_{11} и Z_{22} — собственные продольные сопротивления внешних проводников влияющей цепи и цепи, подверженной влиянию; $i\omega L_3$ — сопротивление третьей цепи, обусловленное внешней индуктивностью L_3 , создаваемой магнитным полем между внешними проводниками коаксиальных цепей.

Заметим, что если коаксиальные цепи соприкасаются, то внешняя индуктивность равна нулю и $Z_3 = Z_{11} + Z_{22} = 2Z_{\text{пр}}$. Используя записанные уравнения можно получить следующие формулы для расчета тока помех на ближнем $I_{20\text{кк}}$ и дальнем $I_{2\text{лкк}}$ концах коаксиального кабеля:

$$I_{20\text{кк}} = -I_{10} \frac{M_{\text{кк}}}{Z_{\text{в}2}} \frac{1 - e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)l}}{2(\gamma_1 + \gamma_2)};$$

$$I_{2\text{лкк}} = I_{1l} \frac{M_{\text{кк}}}{Z_{\text{в}2}} \frac{1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)l}}{2(\gamma_1 - \gamma_2)}.$$

При равенстве электрических характеристик цепей ($Z_{\text{в}1} = Z_{\text{в}2} = Z_2$; $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$) и после подстановки значения $M_{\text{кк}}$ будем иметь

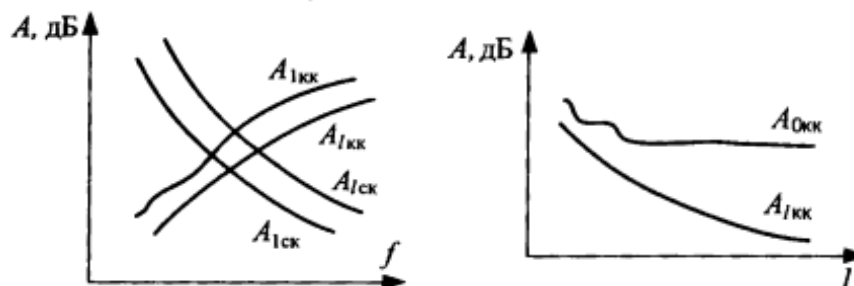
$$I_{20\text{кк}} = -\frac{I_{10}Z_{12}^2(1 - e^{-2\gamma l})}{Z_3 Z_{\text{в}} 4\gamma}; \quad I_{2\text{лкк}} = \frac{I_{1l}Z_{12}^2 l}{2Z_3 Z_{\text{в}}}.$$

Соответственно, переходное затухание на ближнем и дальнем концах коаксиального кабеля равно

$$A_{0\text{КК}} = 20 \lg \left| \frac{I_{10}}{I_{20}} \right| = 20 \lg \left| \frac{4Z_3 Z_B \gamma}{Z_{12}^2 (1 - e^{-2\gamma l})} \right|;$$

$$A_{1\text{КК}} = 20 \lg \left| \frac{I_{10}}{I_{2l}} \right| = 20 \lg \frac{2Z_3 Z_B}{Z_{12}^2 l} + \alpha l.$$

Переходные затухания между коаксиальными парами на ближнем и дальнем концах линии с повышением частоты возрастают (см. рис.),



что определяется:

- закрытым характером электромагнитного поля коаксиальных цепей;
- убыванием интенсивности возбуждающего электромагнитного поля на внешней поверхности внешнего проводника вследствие поверхностного эффекта. В симметричных же кабелях переходные затухания уменьшаются.

Переходное затухание на дальнем конце с увеличением длины уменьшается по гиперболическому закону.

Основными характеристиками, определяющими возможность использования кабельных цепей для передачи различных видов информации, являются переходное затухание на длине A_0 и защищенность A_3 , на дальнем концах. Нормы не указанные параметры устанавливаются исходя из условий выполнения рекомендаций Международного комитета в составе МСЭ - МКТТ (ITU-T).

Для аналоговых систем передачи нормы на параметры взаимных влияния обычно приводятся на длину усилительного участка. По симметричным кабелям связи в настоящее время работают в основном системы передачи К-60П в диапазоне частот 12...252 кГц.

Для этой системы в указанном диапазоне частот установлены нормы: $A_0 \geq 60,8$ дБ; $A_3 \geq 73,8$ дБ для 90 % и $A_3 \geq 71$ дБ — для 100 % комбинаций цепей в кабеле.

На сетях абонентского доступа в мире и в России очень широко используются технологии xDSL (DSL — цифровая абонентская линия, x — версия соответствующей технологии, например HDSL, ADSL, vDSL и др.). Эти технологии обеспечивают высокоскоростную цифровую передачу по абонентским кабелям связи.

Цифровые системы передачи технологий xDSL работают по однокабельной системе, поэтому нормировать нужно взаимные влияния на ближнем конце A_0 , при этом значения A_0 зависят от вида кода, с которым работает конкретная ЦСП.

Для коаксиальных кабелей нормы на переходное затухание на ближнем конце A_0 и защищенность на дальнем конце A_3 усилительного участка определяется из следующих эмпирических выражений: $A_0 \geq 79,9 + 73\sqrt{f}$, дБ; $A_3 \geq 70,4 + 73\sqrt{f}$, дБ. В этих выражениях частота берется в МГц на минимальной частоте линейного спектра системы передачи.

Для повышения защищенности от взаимных влияний применяются следующие основные меры:

- Применение НС, обеспечивающих малые значения взаимных влияний. Так, применение коаксиальных и волоконно-оптических кабелей связи практически полностью решают проблему защиты цепей и трактов НС от взаимных влияний.
- Взаимная компенсация помех между цепями симметричных кабелей связи путем подбора согласованных шагов скрутки цепей. Эта мера применяется при разработке конструкций кабелей связи в заводских условиях.
- Способ сосредоточенной компенсации взаимных помех на ЭКУ (симметрирование кабелей связи).
- Экранирование отдельных цепей и кабеля в целом используется при изготовлении коаксиальных и симметричных кабелей связи.
- Отбор цепей в многопарных абонентских кабелях связи, взаимная защищенность между которыми отвечает установленным нормам. Этот метод применяется при уплотнении цепей цифровыми системами передачи.

Из перечисленных методов остановимся на технических методах повышения защищенности от взаимных влияний путем симметрирования кабелей связи.

Симметрирование — это комплекс мероприятий и электрических измерений, проводимых в процессе строительства и монтажа кабельных линий связи. На практике используют следующие основные методы симметрирования: метод скрещивания, конденсаторный метод и метод концентрированного включения контуров противосвязи.

Симметрирование скрещиванием основано на компенсации электромагнитных связей одного отрезка кабеля связями другого отрезка путем скрещивания жил цепей.

Конденсаторное симметрирование основано на компенсации электрических связей путем включения конденсаторов между жилами взаимовлияющих цепей.

Симметрирование включением контуров противосвязи основано на компенсации электромагнитных связей путем включения между жилами взаимовлияющих цепей контуров противосвязи, содержащих резисторы и конденсаторы.

Конденсаторное симметрирование компенсирует только электрические связи, поэтому оно применяется в основном для низкочастотных кабелей, в которых эти связи являются определяющими.

Симметрирование скрещиванием применяется как для низкочастотных, так и для высокочастотных кабелей. Концентрированное симметрирование контурами противосвязи в основном применяется для ВЧ кабелей

Взаимные влияния между световодами в оптическом кабеле вследствие самоэкранирования направляющей системы, образуемой ОВ, весьма незначительны и носят в основном случайный характер. Эти влияния еще более ослабляются вследствие экранирующего действия защитных покрытий из полиамидных смол, фторопласта, силиконовых резин, полиэтилена и других синтетических материалов, предназначенных в основном для усиления механической прочности ОВ, их защиты от внешних воздействий, улучшения температурных характеристик параметров передачи волокон, облегчения технологии изготовления оптических кабелей и монтажа ОВ. Одновременно эти защитные оболочки, а также раздельное размещение оптических волокон в кабеле повышают защищенность оптических трактов от взаимных помех