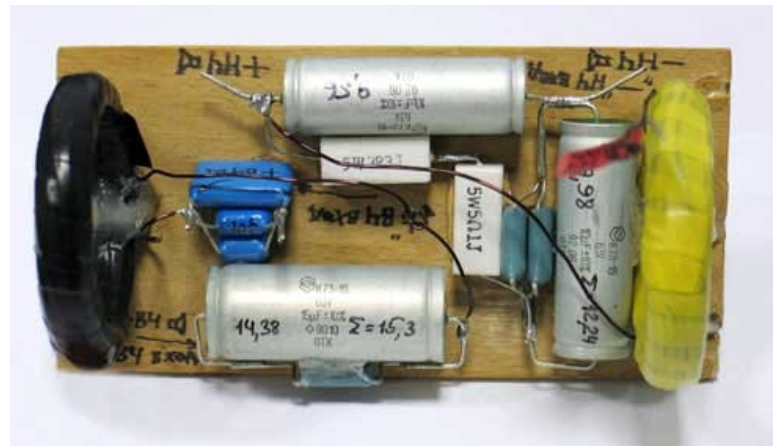


Взаимное влияние катушек в фильтрах АС

Я давно удивлялся тому, что катушки для фильтров колонок делают короткими и большого диаметра. Это технологично, но короткие катушки большого диаметра гораздо чувствительнее к помехам, чем длинные маленького диаметра. Вот пример хорошо сделанных катушек в качественных колонках:



И обратный пример катушек большого диаметра (во всех этих случаях катушка получается не оптимальной по активному сопротивлению, но если в первом случае есть оправдание - лучшая помехозащитность, то во втором оправданий никаких нет):



Причем катушки на правом фото (наихудшие) работают как приемники всего на свете и расположены наихудшим образом. Самое пикантное, что это издание одной российской аудиофильской фирмы, при этом неправильные конструкция и расположение катушек компенсируются стрелочками на проводах.

На рис.1 показана силовая линия магнитного поля помехи (В). Если поле проходит сквозь виток (рис. 1а), то в нем наводится ЭДС. Если силовая линия сквозь виток не проходит (рис. 1б), то оно на виток и не воздействует. В случае короткой катушки, помеха воздействует на все витки (рис.1в), если же катушка длинная (рис.1 г), то поле воздействует лишь на небольшую часть витков, и это воздействие тем меньше, чем меньше диаметр катушки.

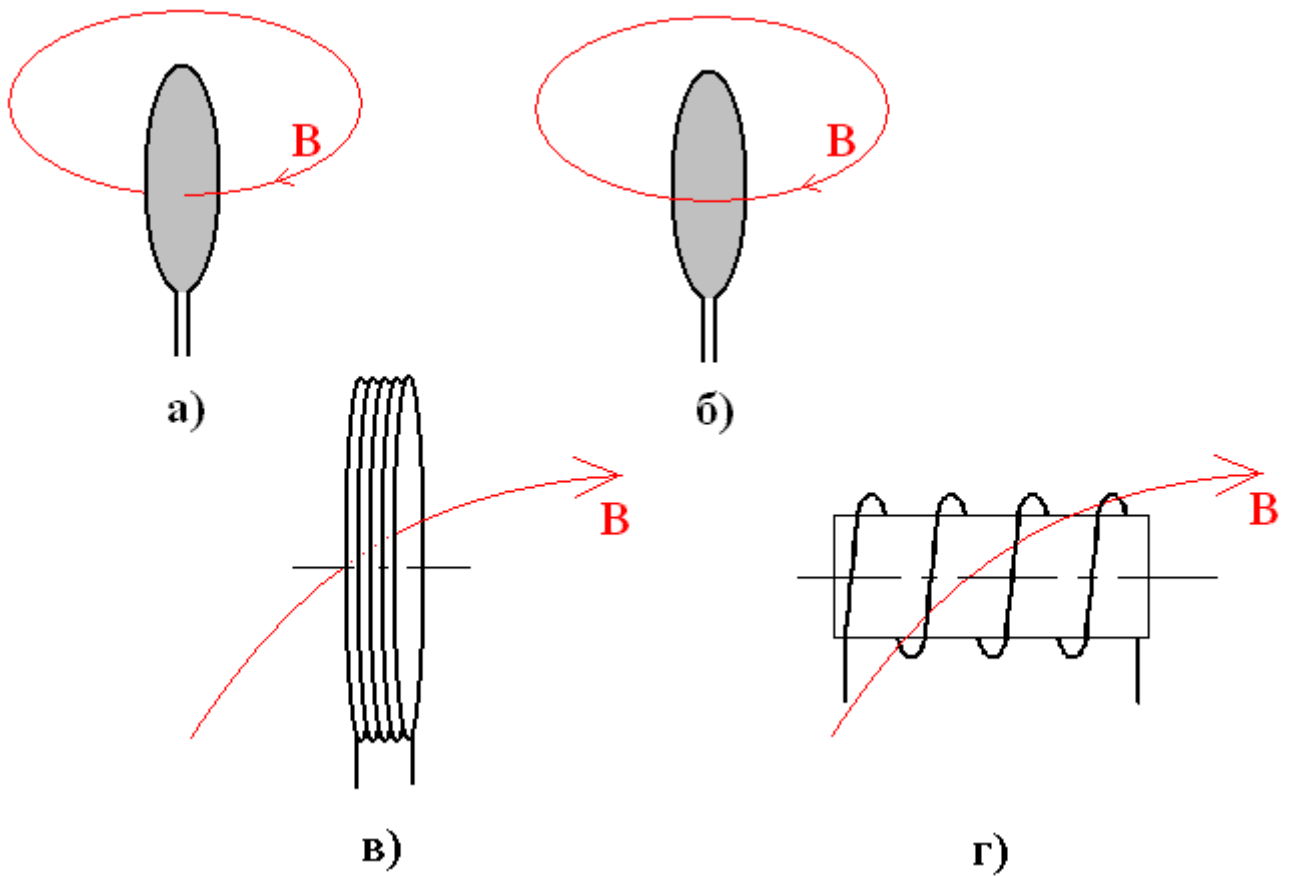


Рис.1

Но это было не настолько веской причиной, чтобы про это писать. Тем более, что передача помех по воздуху на звуковых частотах довольно слаба.

Не так давно мне понадобилось послушать звучание ВЧ динамиков. Я собрал LC-фильтр, подключил на "крокодилах" динамик, подал сигнал с компьютерного усилителя (рис.2). Чтобы колонки не мешали, я вынул по одному проводу из их терминалов.

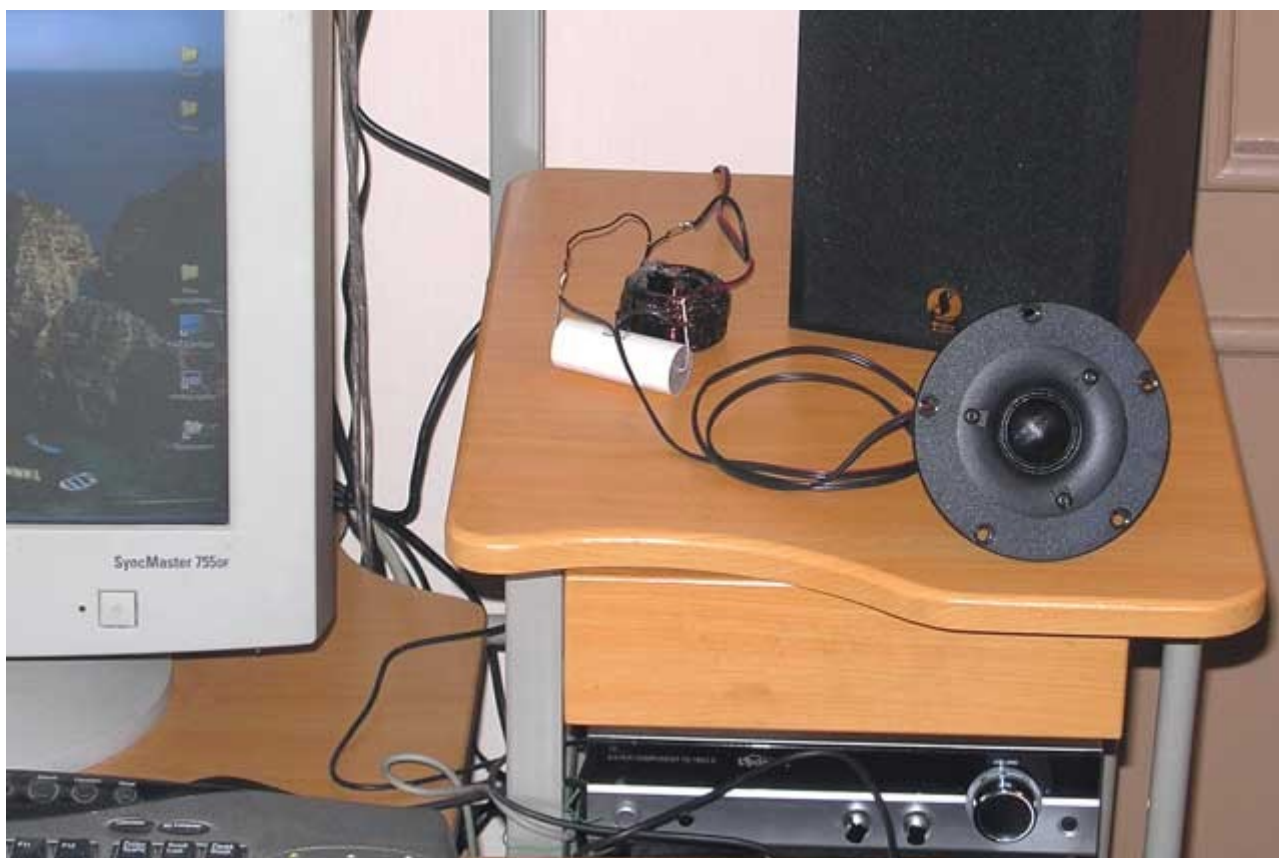


Рис. 2.

Подключил один динамик, послушал. Отсоединил, взял второй, начал подключать... Наклонился над схемой и вдруг услышал, что колонка играет!!! Хоть и очень-очень тихо. Причем оба ее динамика: и ВЧ, и НЧ! Первой моей мыслью было - наверное отсоединенный провод слегка касается самореза терминала, тот в свою очередь где-то внутри колонки касается деталей кроссовера, вот сигнал и проходит. Проверил: ничего подобного. Отсоединил от колонки и второй провод. Звук остался!

Причина была такая: магнитное поле, создаваемое катушкой моего "настольного" фильтра наводило в колонку сигнал, достаточный для ее очень тихого, но звучания. Изменяя положение катушки, я изменял и громкость звучания колонки.

Но на что же именно в колонке влияет магнитное поле катушки? Непосредственно на динамики магнитное поле влияет очень слабо - при поднесении катушки прямо к динамику, а динамика - прямо к уху, звук еле-еле слышно. Причем независимо от того - экранированный динамик, или нет. Значит, наводка идет на катушки кроссовера (в этой колонке их две - на ВЧ и на НЧ).

Для проверки этой гипотезы, я взял две катушки (из старого кроссовера, поэтому они не очень красиво выглядят, но зато работают - отлично!) индуктивностью примерно по 500 мкГн (рис.3).



Рис 3.

Одну из них через резистор 6 Ом подключил к тому же комповому усилителю, а вторую катушку - к динамику (рис. 4).



Рис. 4.

Результат: при работе усилителя на полную мощность и расстоянии между катушками 1 см (спичечный коробок), динамик играл довольно даже громко - 64 дБ на расстоянии 0,5 метра! Я делаю такую громкость, когда хочу слышать звуки Винды и программ (например некоторых игр), но чтобы они мне не мешали.

Конечно, такое положение катушек наиболее неоптимальное, но тем не менее, выходит, что взаимное влияние катушек прямо-таки сразу отбрасывать не стоит. Давайте проверим, как катушки влияют друг на друга. Нечто подобное делал Дуглас Селф, но он исследовал катушки, включаемые на выходе усилителя, а они - мелочь по сравнению с катушками кроссоверов. Кроме того, Селф исследовал катушки на холостом ходу, а в реальности к ним подключены динамики, что вызывает уменьшение наводимого напряжения. Кроме того, я попробовал обобщить все это дело, чтобы можно было оценить наводки в любых ситуациях.

Я пропускал через одну катушку ток 1 ампер на частоте 10 кГц. А вторую располагал определенным образом относительно первой и измерял наведенную в ней ЭДС (все величины - действующие значения). Измерения проводились и на холостом ходу, и под нагрузкой 8 Ом (нагрузка подключалась параллельно катушке-приемнику). На графиках приведена как абсолютная ЭДС, наводимая в катушке-приемнике, так и относительная в дБ - относительно напряжения 8 Вольт, требуемого для получения тока 1 Ампер.

Итак (расстояние измерялось непосредственно между обмотками катушек), это расположение - самое плохое:

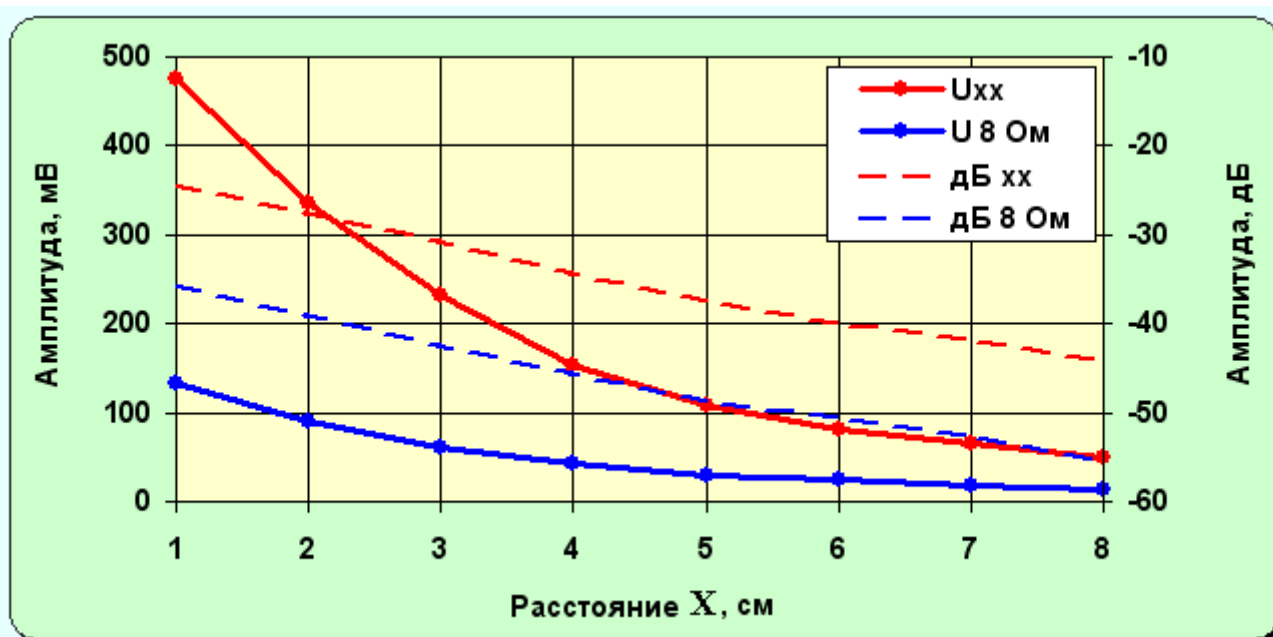
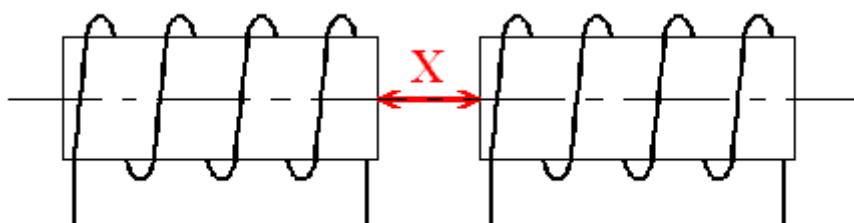


Рис. 5. Позиция 1.

Второй вариант лучше:

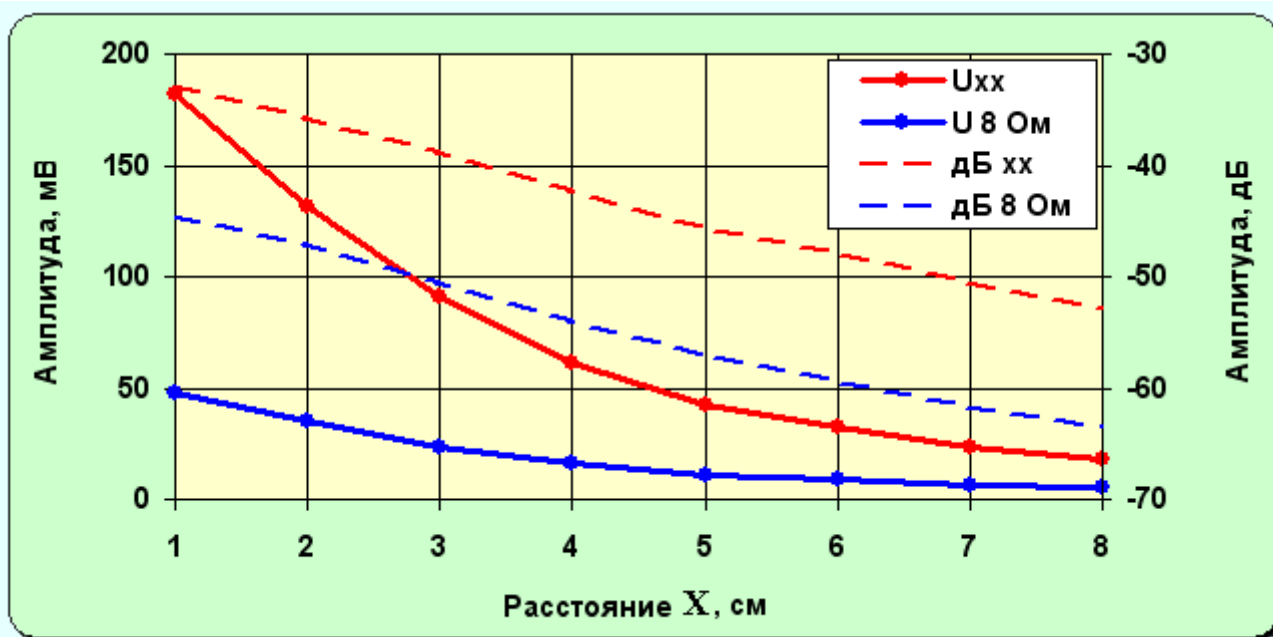
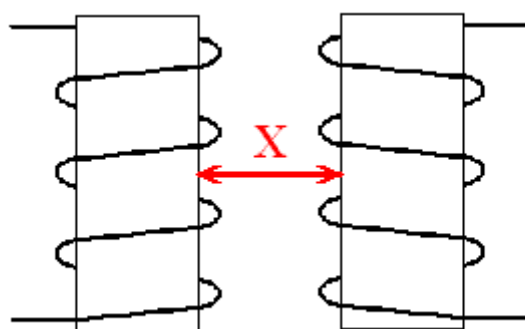


Рис. 6. Позиция 2.

Еще вариант - примерно то же самое (но тут геометрия катушек влияет на результат гораздо сильнее, чем в предыдущем случае):

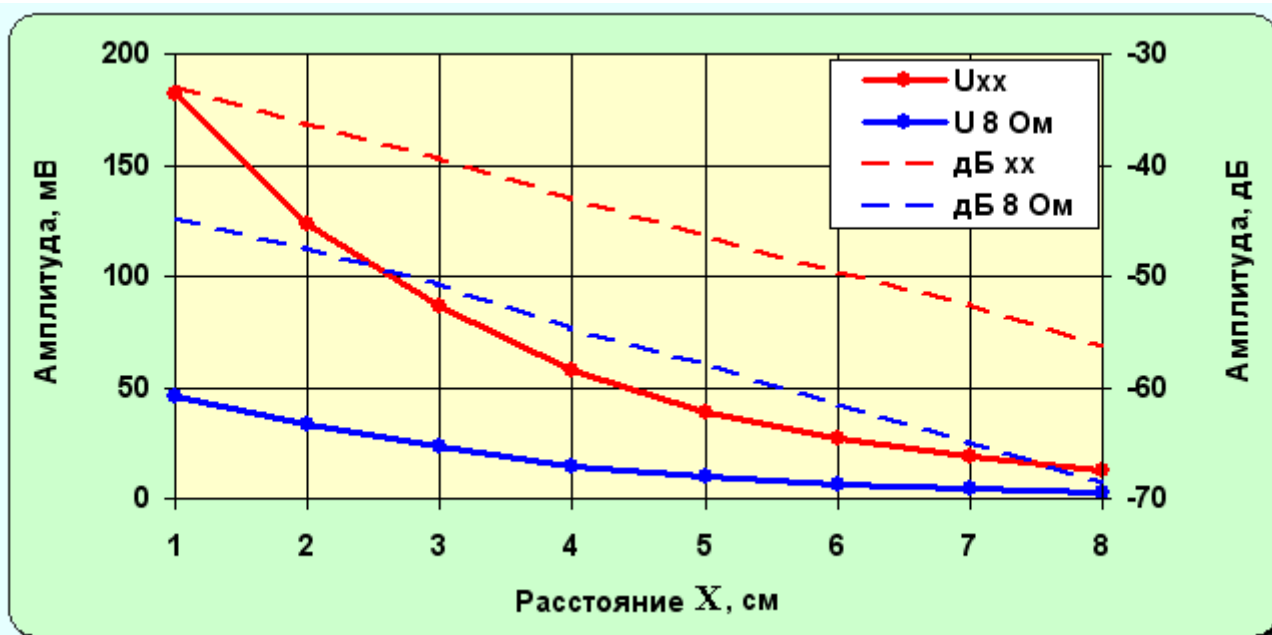
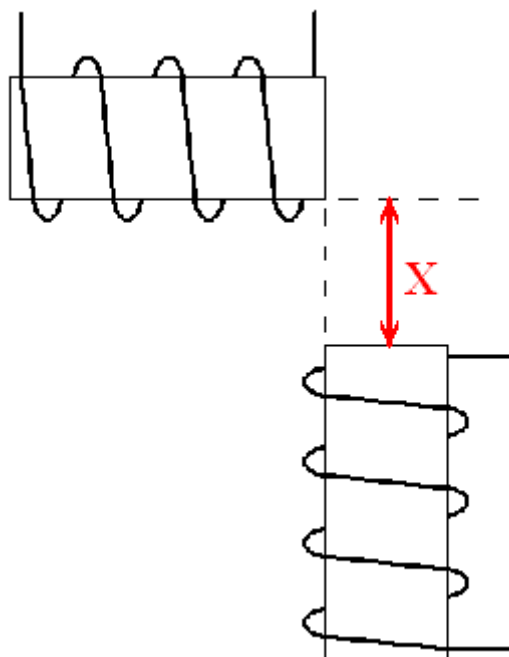


Рис. 7. Позиция 3.

Такое расположение - еще чуть-чуть лучше:

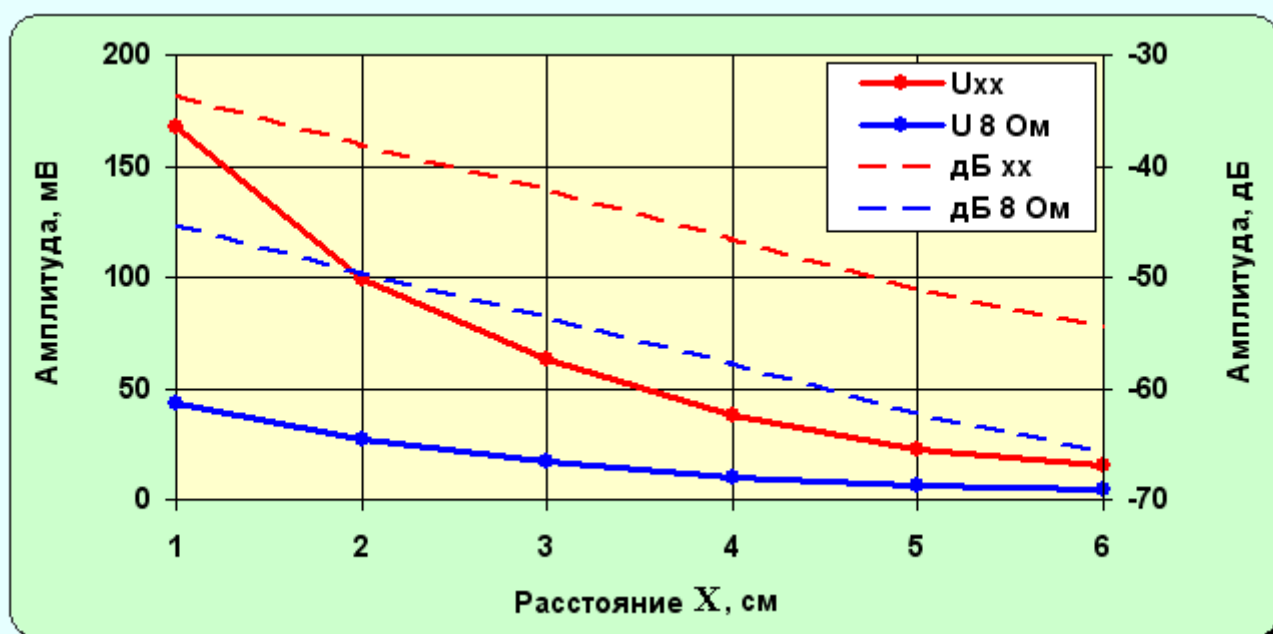
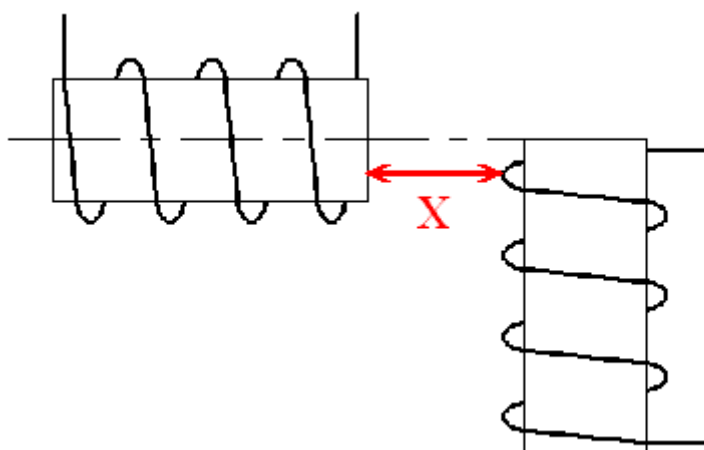


Рис. 8. Позиция 4.

Самое лучшее расположение - симметричное. В идеале наводок вообще никаких не должно быть (наводки на обе половины катушки одинаковы и противоположны, поэтому вычитаются до нуля)! Но в реальности абсолютной симметрии катушек получить не удастся. Более того, небольшой сдвиг катушки в сторону резко нарушает эту самую симметрию, поэтому мне пришлось сделать направляющие и перемещать катушку вдоль них - при малейшем сдвиге в сторону напряжение в катушке-приемнике резко возрастало.

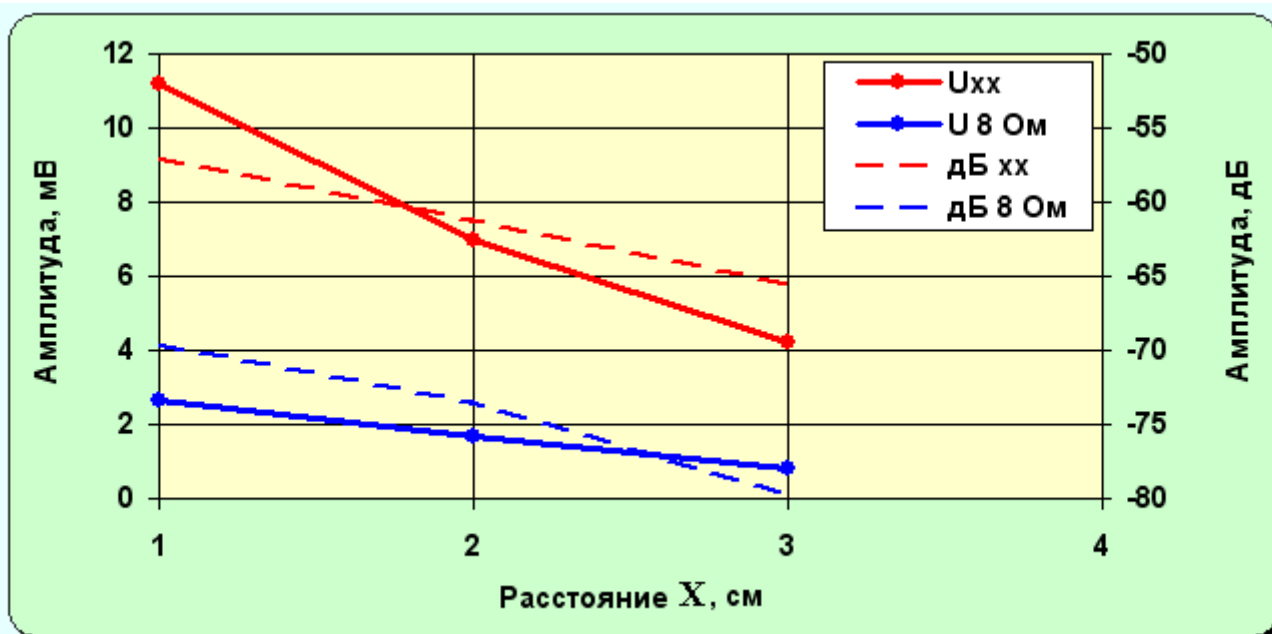
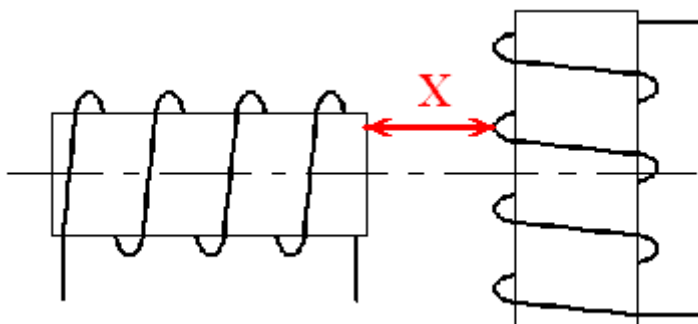


Рис. 9. Позиция 5.

В принципе, если катушки несимметричны, то можно добиться их почти абсолютного взаимного не-влияния, расположив их также немного несимметрично. Т.е. если немного поколдовать. Но там уже начинает сказываться влияние отдельных проводков, идущих к катушкам.

На всех этих графиках линии, показывающие амплитуду в дБ, должны быть прямыми. Их отклонение от прямой - погрешность эксперимента, в основном она вызвана некоторым смещением катушек от заданного взаимного положения и неточностью установки (или измерения) расстояния X.

Теперь повторим опыт №1 (рис. 5), но на частоте 1 кГц:

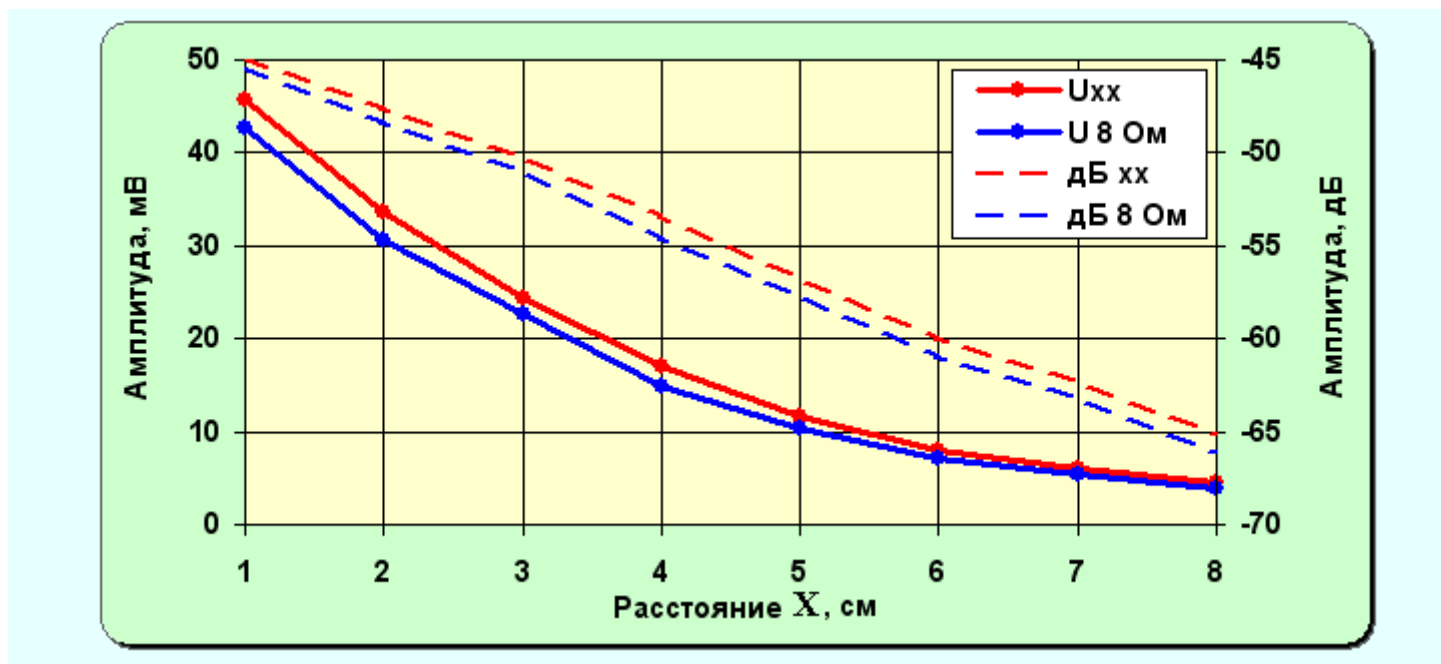
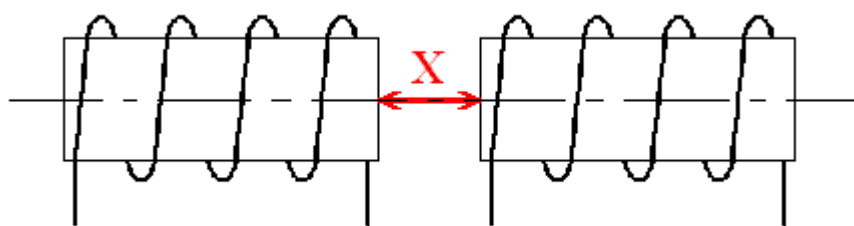


Рис. 10.

Результаты предсказуемые. Во-первых, амплитуда на xx уменьшилась пропорционально частоте, то есть на порядок (с учетом погрешности). Во-вторых, разница между напряжением на xx и под нагрузкой также уменьшилась. Поясню этот второй факт. Система из двух катушек образует трансформатор (с воздушным сердечником). Полная T-образная схема замещения трансформатора нас сейчас не интересует, а упрощенно (и главное) получается вот что:

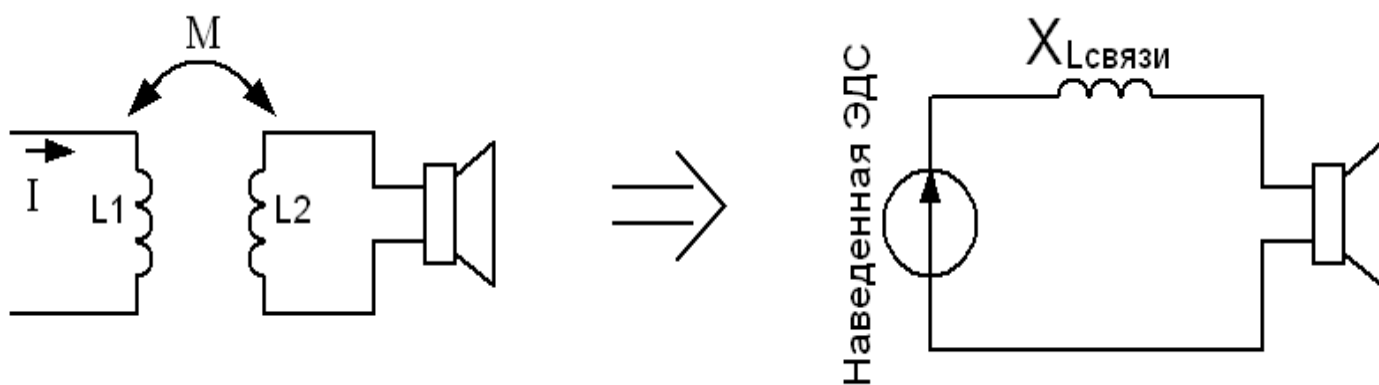


Рис 11.

Здесь M - взаимоиндуктивность катушек. Из схемы замещения трансформатора остается только X_L связи (т.к. активное сопротивление катушек очень мало, а поперечная ветвь вообще нам не нужна). $L_{\text{связи}} = \text{const}$ при неизменном взаимном положении, а его индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте. На высоких частотах это сопротивление больше, больше и падение напряжения на нем при протекании тока, больше и просадка напряжения под нагрузкой.

Пока что физика на нашей стороне: на низких частотах меньше наведенная ЭДС, на высоких ЭДС больше, но больше и просадка напряжения под нагрузкой - в любом случае нагруженные катушки имеют меньшее напряжение наводок.

Рассчитать параметры схемы замещения можно по формулам:

$$E_{\text{наведенное}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I \cdot M \quad (1)$$

$$L_{\text{связи}} = L_1 + L_2 - 2 \cdot M \quad (2)$$

Рис. 12.

Здесь f - частота, I - ток, M - взаимная индуктивность катушек. Все величины в Вольтах, Амперах, Генри, Герцах. Вот только взаимную индуктивность теоретически рассчитать не представляется возможным. Зато можно измерить: через одну катушку пропустить переменный ток, а в другой померять напряжение на холостом ходу, и из формулы (1) рис.12.

Менее точно (но с достаточной точностью) можно определить взаимную индуктивность M из моих опытов. Для этого мне нужно было отрешиться от индуктивности моих катушек и определить коэффициент индуктивной связи K между ними. Вот графики, соответствующие взаимным расположениям, показанным на рисунках 5-9:

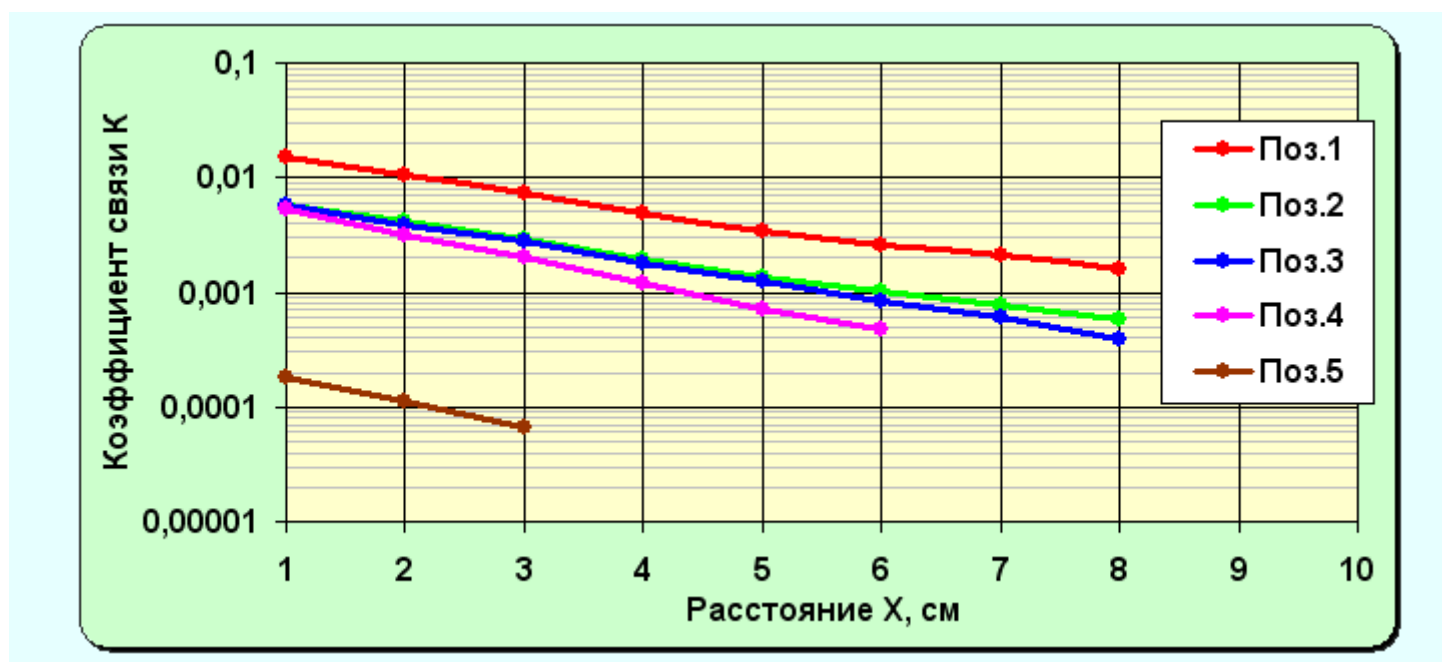


Рис. 13.

Для определения взаимной индуктивности M в произвольном случае, нужно коэффициент связи K , взятый из графика, умножить на корень из произведения индуктивностей обеих катушек. Вот формула для определения M :

$$M = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Рис.14.

Вот пример расчета для 1-й позиции (рис.5), тока 1 Ампер, расстояния между катушками 1 см и индуктивностью каждой $L_1=L_2=500$ мкГн:

$$M = 0,015 \cdot \sqrt{500 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 7,5 \cdot 10^{-6} \quad \text{Гн}$$

$$E_{\text{наведенное}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} = 0,471 \quad \text{В}$$

$$L_{\text{связи}} = 500 \cdot 10^{-6} + 500 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} = 985 \quad \text{мкГн}$$

Рис.15.

Как видно, $E_{\text{наведенное}}$ совпадает с измеренной ЭДС на холостом ходу. На частоте 10 кГц $L_{\text{связи}}$ имеет сопротивление порядка 60 Ом, поэтому просадка напряжения под нагрузкой большая.

Для учета формы катушки (вспомним, с чего все началось: катушка может быть тонкой и длинной, или короткой большого диаметра), при вычислении взаимной индуктивности можно воспользоваться эмпирическим поправочным коэффициентом (очень-преочень грубым), равным квадратному корню из отношения диаметра катушки к ее длине (в одинаковых единицах, например, в сантиметрах):

$$M = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot \sqrt{\frac{D}{l}}$$

Рис.16.

В заключение хочется отметить, что все же взаимное влияние катушек весьма незначительно, и если не делать грубых ошибок, то оно вреда никакого и не принесет.