

# Семинар №3 по курсу «Электромагнитная совместимость РЭС».

## Моделирование помехоподавляющего фильтра нижних частот.

к.т.н., доцент кафедры ЭИУ1-КФ Кузнецов В.В.

8 октября 2014 г.

### 1 Введение

Целью семинара является изучение свойств помехоподавляющих пассивных LC-фильтров, моделирование частотных зависимостей их S-параметров и Z-параметров.

### 2 Схемы помехоподавляющих фильтров

Основным средством подавления кондуктивных помех, создаваемых в цепях питания и коммутации постоянного и переменного токов аппаратуры, является фильтрация. Предназначенные для этой цели фильтры позволяют снижать кондуктивные помехи как от внешних так и от внутренних источников (например со стороны сети питания и нагрузки). Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра (дБ):

$$S = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right| \quad (1)$$

$$S = 20 \lg \left| \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right| \quad (2)$$

где  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{I}_1$  — напряжение и ток помех на нагрузке в исходном состоянии,  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{I}_2$  — напряжение и ток помех на нагрузке в цепи с фильтром.

По своему назначению помехоподавляющие фильтры являются широкополосными фильтрами нижних частот (ФНЧ). Фильтры в цепях питания строятся как индуктивно- или резистивно-емкостные (LC или RC). Наиболее часто применяется П-образный LC-фильтр (схема рис.1).

Затухание является частотнозависимым и определяется по выражению:

$$S = 20 \lg \left| \frac{A_{11} + A_{12} + A_{21}Z_i Z_n + A_{22}Z_n}{Z_i + Z_n} \right| \quad (3)$$

$$A_{11} = 1 + \frac{Z_L}{Z_C} \quad (4)$$

$$A_{12} = Z_L \quad (5)$$

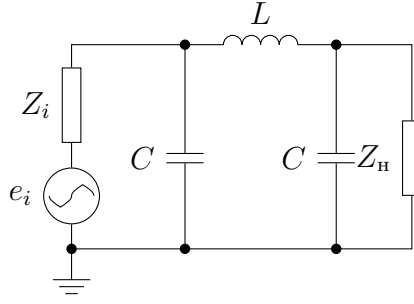


Рис. 1. Схема помехоподавляющего П-образного ФНЧ.  $Z_i$  — внутреннее сопротивление источника,  $Z_n$  — внутренне сопротивление нагрузки.

$$A_{21} = \frac{2}{Z_C} + \frac{Z_L}{Z_C^2} \quad (6)$$

$$A_{22} = \frac{1 + Z_L}{Z_C} \quad (7)$$

$Z_C$  и  $Z_L$  — индуктивное и емкостное сопротивления:

$$Z_L = j\omega L \quad (8)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (9)$$

Для фильтрации помех в цепях постоянного тока применяется П-образный ФНЧ с двухобмоточным дросселем с тороидальным ферритовым сердечником (рис.2). При использовании двухобмоточного дросселя постоянный составляющие токов, протекающие по его обмоткам взаимно компенсируются и не оказывает влияние на магнитные свойства сердечника. Нескомпенсированная постоянная составляющая приводит к снижению магнитной проницаемости сердечника, снижению индуктивности катушки и снижению фильтрующих свойств.

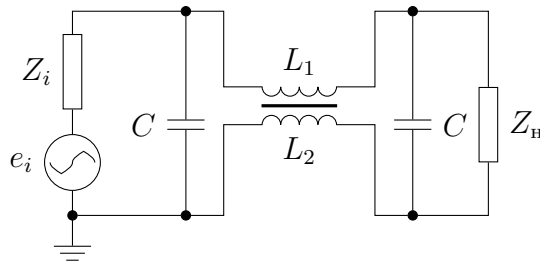


Рис. 2. Помехоподавляющий фильтр с двухобмоточным дросселем.

Подобные фильтры включаются по входной цепи импульсных источников питания (ИИП).

Высокий коэффициент затухания не может быть получен с однозвённым фильтром, поэтому применяется каскадирование фильтров. На рис.3 показан трёхзвённый помехоподавляющий фильтр.

При слишком большом числе звеньев фильтр становится громоздким, и высокое затухание всё равно не может быть достигнуто, так как начинают проявляться просачивания сигнала через паразитные ёмкости монтажа. Поэтому для многзвённых фильтров целесообразно применение экранирования отдельных секций.

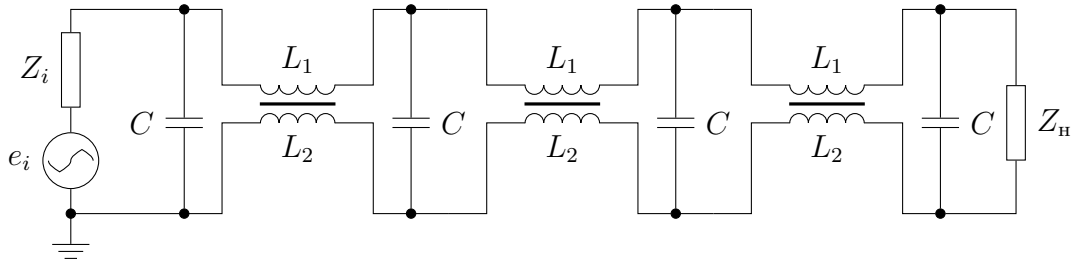


Рис. 3. Трёхзвенный помехоподавляющий фильтр с двухобмоточным дросселем.

## 2.1 S-параметры пассивного четырёхполюсника

## 2.2 S-параметры четырёхполюсника

П-образный ФНЧ является пассивным четырёхполюсником. Свойства пассивного четырёхполюсника в частотной области можно описать при помощи S-параметров.

Четырёхполюсником является любая электронная схема, имеющая один вход и один выход: усилитель, фильтр, аттенуатор. Активный четырёхполюсник содержит источники питания и может усиливать входной сигнал. Активный четырёхполюсник как правило содержит биполярный или полевой транзистор, интегральный операционный усилитель и т.п. схемы. Пассивный четырёхполюсник не имеет источников питания, и не может усиливать сигнал. К пассивным четырёхполюсникам относятся LC- и RC- фильтры которые содержат только индуктивность, ёмкость и сопротивление.

В радиотехнике для того, чтобы охарактеризовать четырёхполюсник применяется матрица S-параметров, или иначе матрица рассеяния. S-параметры устанавливают связь между нормированными амплитудами напряжения и тока на входе и на выходе четырёхполюсника. Если вход четырёхполюсника подключен к источнику переменного тока (генератору колебаний) с некоторым выходным сопротивлением  $Z_1$ , то часть энергии от источника передаётся на вход, а часть — отражается от входа. Пусть нормированная амплитуда падающей на вход волны равна  $a_1$ , а отражённой волны  $b_1$ .

Такое же рассуждение справедливо и для выхода четырёхполюсника, к которому подключена нагрузка с сопротивлением  $Z_2$ . Часть энергии, поступающей с выхода четырёхполюсника, поглощается нагрузкой, а часть энергии — отражается от неё и поступает обратно в четырёхполюсник. Пусть нормированная амплитуда падающей на нагрузку волны равна  $a_2$ , а отражённой от нагрузки волны  $b_2$ .

Нормированные амплитуды падающей и отражённой волны на входе и на выходе связаны через матрицу рассеяния:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (10)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (11)$$

Физический смысл S-параметров следующий:

$S_{11}$  — коэффициент отражения  $\Gamma_1$  от входа четырёхполюсника. Показывает степень согласования между источником входного сигнала (генератором колебаний) и входными цепями четырёхполюсника. Если  $S_{11} = 0$ , то вся энергия от источника входного сигнала проходит на вход четырёхполюсника без отражения.

$S_{12}$  — коэффициент обратной передачи. Показывает степень передачи энергии с выхода четырёхполюсника на вход. Характеризует степень развязки между входом и выходом, что показывает устойчивость активных четырёхполюсников.

$S_{21}$  — коэффициент передачи. Равен коэффициенту усиления по мощности четырёхполюсника. Для активных четырёхполюсников может быть больше единицы, а для пассив-

ных — всегда меньше единицы.

$S_{22}$  — коэффициент отражения  $\Gamma_2$  от нагрузки. Показывает степень передачи энергии с выхода в нагрузку. Если  $S_{22} = 0$ , то вся энергия с выхода четырёхполюсника поглощается нагрузкой без отражения.

Для пассивных четырёхполюсников всегда  $S_{21} = S_{12}$  и  $S_{11} = S_{22}$ , так как внутрь четырёхполюсника не поступает дополнительная энергия от источников питания.

Матрица S-параметров может быть преобразована в матрицу Z-параметров. В Qucs уже встроена готовая функция для расчёта S-параметров по Z-параметрам. Она называется `stoz()`. Z-параметры представляют собой входное, выходное и проходное сопротивление четырёхполюсника. Следует обратить внимание на следующие Z-параметры:

$Z_{11}$  — входное комплексное сопротивление (импеданс);

$Z_{22}$  — выходное комплексное сопротивление (импеданс);

## 3 Моделирование ФНЧ в программе Qucs

### 3.1 Моделирование П-образного ФНЧ

Чтобы узнать параметры П-образного ФНЧ нужно произвести моделирование его S-параметров. Частотной зависимости коэффициента передачи фильтра  $S_{21}$  (АЧХ) будет соответствовать параметру `S[2,1]`. Схема помехоподавляющего фильтра в программе Qucs показана на рис.4.

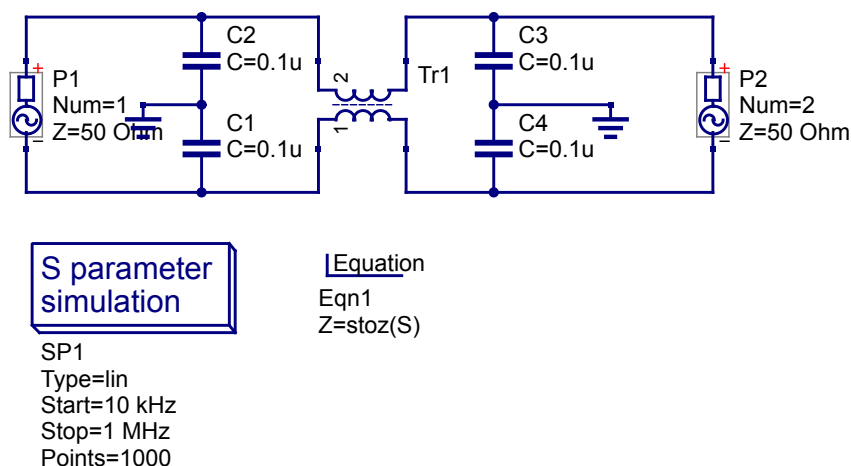


Рис. 4. П-образный фильтр с двухобмоточным дросселем в Qucs.

Параметры компонента Индуктивно связанные катушки (Tr1) показаны на рис.5. Используется дроссель с индуктивностью обмоток  $2 \times 0.8$  мГн. Диалоговое окно вызывается двойным щелчком по компоненту.

Частотная зависимость параметра  $S_{21}$ , полученная в результате моделирования, показана на рис.6.

### 3.2 Задание для самостоятельной работы

Собрать в программе Qucs схему на рис.4 и добиться её работоспособности. Выполнить моделирование S-параметров и Z-параметров. Построить графики частотной зависимости параметров  $S_{21}$  (коэффициент передачи) и  $Z_{11}$  (входное сопротивление).

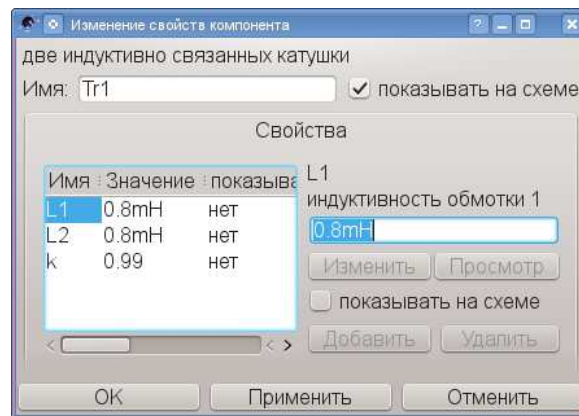


Рис. 5. Параметры трансформатора Tr1.

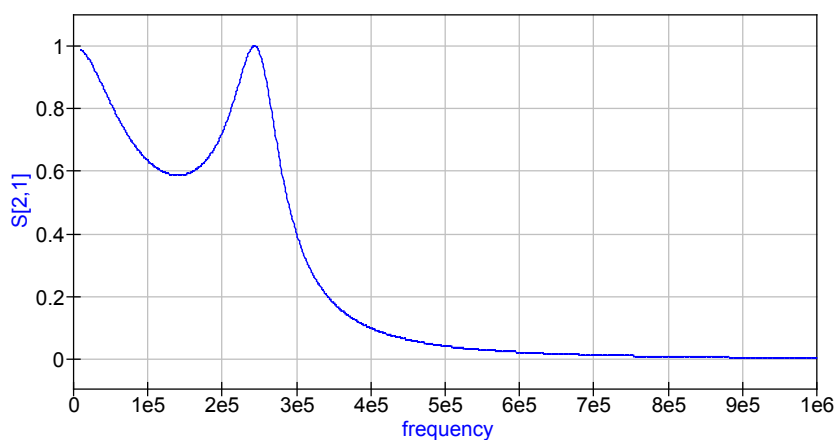


Рис. 6. АЧХ П-образного ФНЧ.

Промоделировать схему трёхзвённого П-образного ФНЧ (рис.2). Выполнить моделирование S-параметров и Z-параметров. Построить графики частотной зависимости параметров  $S_{21}$  (коэффициент передачи) и  $Z_{11}$  (входное сопротивление). Сравнить АЧХ однозвённого и трёхзвённого фильтров. Чем объясняется различие АЧХ?

## 4 Заключение

В результате выполнения семинара студенты ознакомились с практическими способами подавления промышленных радиопомех в цепях питания РЭА при помощи пассивных ЛС-ФНЧ. Произведено моделирование частотных параметров фильтров.