

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

## Моделирование помехоподавляющего фильтра нижних частот.

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

2 октября 2015 г.

### 1 Введение

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

### 2 Пассивные фильтры

Передаточные функции фильтров Чебышева, Баттерворта и Кауэра можно реализовать используя четырёхполюсник, содержащий только LC-элементы.

Наиболее распространённой топологией пассивных фильтров является лестничный фильтр. Лестничный фильтр выполняется на основе П-образных звеньев. На рис.1 и рис.2 показаны схемы лестничных ФНЧ и ФВЧ соответственно.

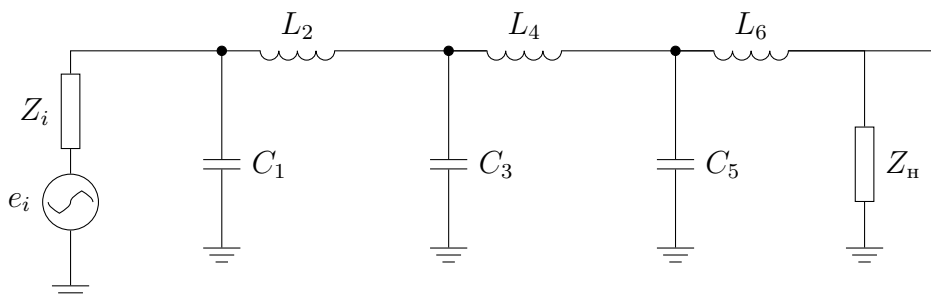


Рис. 1. Трёхзвённый лестничный ФНЧ 6-го порядка

В качестве примера рассмотрим расчёт элементов ФНЧ Баттерворта. Для фильтра, включённого на нагрузку  $Z_0 = Z_i = Z_n$ ,  $k$ -й элемент (рис.1) фильтра  $n$ -го порядка с частотой среза  $\omega_c = 2\pi f_c$  и рассчитывается следующим образом:

$$\text{ёмкость (Ф):} \quad C_k = \frac{X_k}{Z_0} \quad (1)$$

$$\text{индуктивность (Гн):} \quad L_k = X_k \cdot Z_0 \quad (2)$$

$$\text{где} \quad X_k = \frac{2}{\omega_c} \cdot \sin \frac{(2k+1) \cdot \pi}{2n} \quad (3)$$

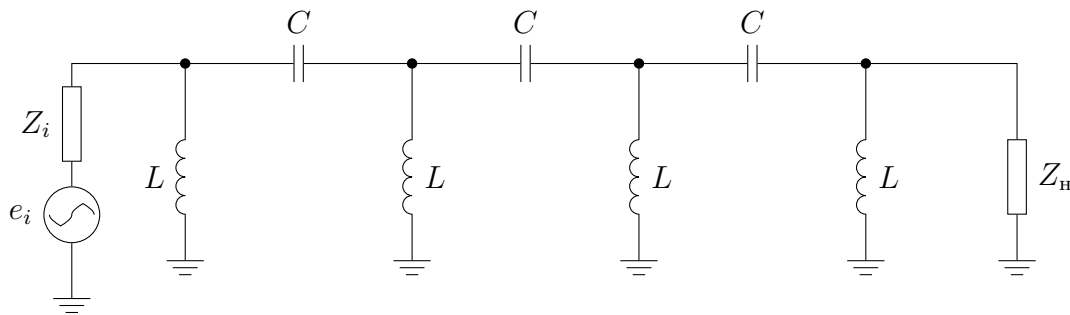


Рис. 2. Трёхзвённый лестничный ФВЧ

Индексация  $k$  начинается с нуля. Например, чтобы найти значение  $L_1$  в данные формулы нужно подставлять  $k = 0$ , а чтобы найти  $C_5$  нужно задать  $k = 4$ .

Если LC-элементы с данными параметрами реализовать невозможно (например в СВЧ-фильтрах), то их можно заменить другими колебательными системами: МПЛ, кварцевыми резонаторами, устройствами функциональной электроники. Пассивные фильтры не обеспечивают усиление сигнала.

## 2.1 Задание для самостоятельной работы

Пользуясь формулами из предыдущего раздела, рассчитать пассивный LC-фильтр Баттерворта 6-го порядка (схема рис.1) с частотой среза:  $f_c = 10$  кГц для группы РПД-111 и  $f_c = 16$  кГц для группы РПД\_С-111. Нагрузка фильтра  $Z_0 = 600$  Ом. Промоделировать данный фильтр в Qucs и получить АЧХ. Какова частота среза фильтра. Расчёты и результаты моделирования включить в отчёт.

## 3 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):

$$S = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right| \quad (4)$$

$$S = 20 \lg \left| \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right| \quad (5)$$

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 частот применяется П-образный LC-фильтр (схема рис.3).

Затухание является частотнозависимым и определяется по выражению:

$$S = 20 \lg \left| \frac{A_{11} + A_{12} + A_{21}Z_iZ_H + A_{22}Z_H}{Z_i + Z_H} \right| \quad (6)$$

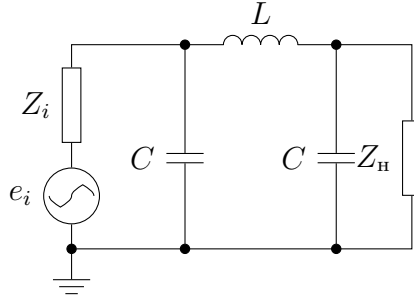


Рис. 3. Схема помехоподавляющего П-образного ФНЧ.  $Z_i$  — внутреннее сопротивление источника,  $Z_H$  — внутренне сопротивление нагрузки.

$$A_{11} = 1 + \frac{Z_L}{Z_C} \quad (7)$$

$$A_{12} = Z_L \quad (8)$$

$$A_{21} = \frac{2}{Z_C} + \frac{Z_L}{Z_C^2} \quad (9)$$

$$A_{22} = \frac{1 + Z_L}{Z_C} \quad (10)$$

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

$$Z_L = j\omega L \quad (11)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (12)$$

Для фильтрации помех в цепях постоянного тока применяется П-образный ФНЧ с двухобмоточным дросселем с тороидальным ферритовым сердечником (рис.4). При использовании двухобмоточного дросселя постоянные составляющие токов, протекающие по его обмоткам взаимно компенсируются и не оказывают влияния на магнитные свойства сердечника. Нескомпенсированная постоянная составляющая приводит к снижению магнитной проницаемости сердечника, снижению индуктивности катушки и снижению фильтрующих свойств.

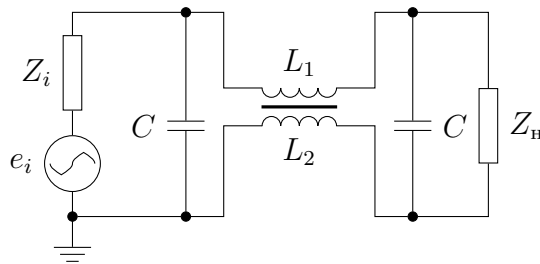


Рис. 4. Помехоподавляющий фильтр с двухобмоточным дросселем.

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

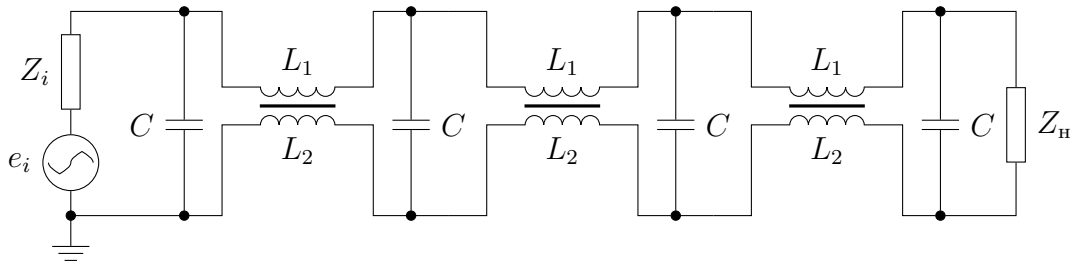


Рис. 5. Трёхзвенный помехоподавляющий фильтр с двухобмоточным дросселем.

Высокий коэффициент затухания не может быть получен с однозвённым фильтром, поэтому применяется каскадирование фильтров. На рис.5 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 многозвённых фильтров целесообразно применение экранирования отдельных секций.

### 3.1 S-параметры пассивного 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, аттенюатор. 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:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (13)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (14)$$

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 четырёхполосника. Если  $S_{11} = 0$ , то вся энергия от источника входного сигнала проходит на вход четырёхполосника без отражения.

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

$S_{21}$  — коэффициент передачи. Равен коэффициенту усиления по мощности четырёхполосника. Для активных четырёхполосников может быть больше единицы, а для пассивных — 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 четырёхполосника поглощается нагрузкой без отражения.

Для пассивных четырёхполосников всегда  $S_{21} = S_{12}$  и  $S_{11} = S_{22}$ , так как внутрь четырёхполосника 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 S-параметрам. Она называется `stoz()`. Z-параметры представляют собой входное, выходное и проходное сопротивление четырёхполосника. Следует обратить внимание на следующие Z-параметры:

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

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

## 4 Моделирование ФНЧ в программе Qucs

### 4.1 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.6.

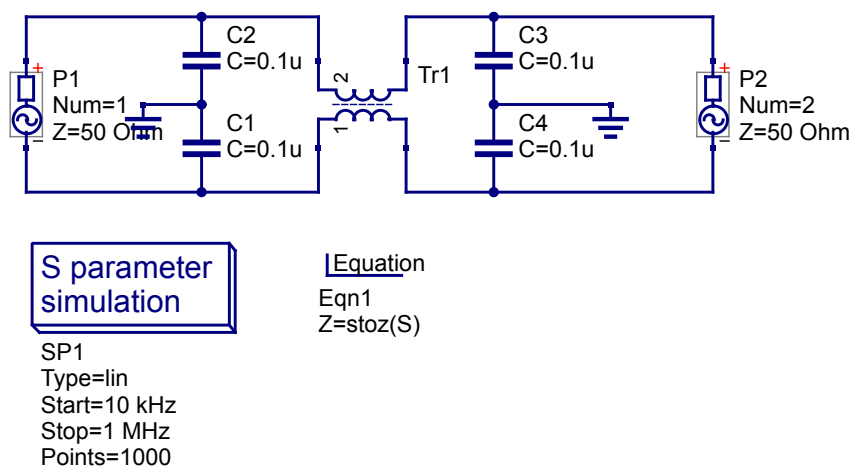


Рис. 6. П-образный фильтр с двухобмоточным дросселем в Qucs.

Параметры компонента Индуктивно связанные катушки (Tr1) показаны на рис.7. 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.8.

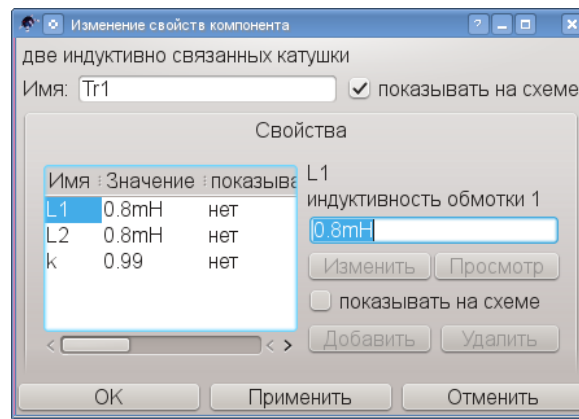


Рис. 7. Параметры трансформатора Tr1.

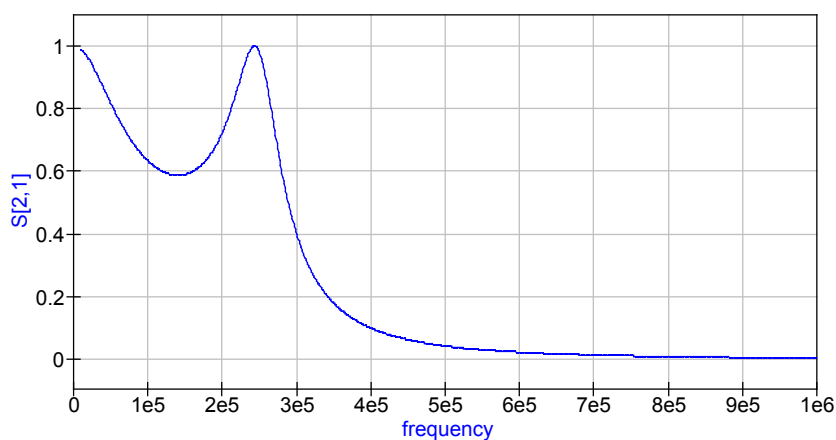


Рис. 8. АЧХ П-образного ФНЧ.

## 4.2 Задание для самостоятельной работы

Собрать в программе Qucs схему на рис.6 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).

Промоделировать схему трёхзвённого П-образного ФНЧ (рис.4). 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?

## 5 Заключение

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