

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.66032/2221-2574-2021-1-1-55-67

УДК 621.396.669.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Драч Владимир Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

E-mail: drach@bmstu-kaluga.ru

Кондрашов Павел Вячеславович

магистрант, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

E-mail: p.kondrashov.radio@yandex.ru

Саввин Михаил Александрович

магистрант, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

E-mail: 79108644148@yandex.ru

Адрес: 248000, Российская Федерация, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.

Аннотация: При разработке помехоподавляющих фильтров параметры разработанного изделия зачастую не соответствуют теоретически ожидаемым. Во многом это происходит по причине неправильного анализа конструкции будущего фильтра, из-за чего не учитываются многие паразитные связи, снижающие эффективность фильтрации. В настоящей работе рассмотрено влияние паразитных параметров компонентов и элементов крепежа на частотную характеристику фильтра. Для аппроксимации использовались эквивалентные схемы элементов и последовательно включённые трансформаторы в режиме короткого замыкания. Моделирование проводилось в диапазоне частот 10 кГц – 1 ГГц. Моделирование паразитных параметров фильтра проводилось в программе-симуляторе QUCS. По результатам моделирования были даны рекомендации по оптимизации элементов крепления фильтра и изменению индуктивности дросселей низкой частоты.

Ключевые слова: помехоподавляющий фильтр, паразитные параметры, Qucs, АЧХ, эквивалентная схема.

Введение

Как правило, чувствительное радиоэлектронное оборудование разработчики защищают внедрёнными схемами подавления высокочастотных помех — помехоподавляющими фильтрами.

Помехоподавляющий фильтр необходим при использовании импульсных источников электропитания для защиты питающих линий первичной и вторичной цепи от высокочастотных наводок, создаваемых импульсным трансформатором. Данный фильтр должен защищать одновременно от синфазных и противофазных помех. Синфазные помехи образуются

между питающей линией и общим проводом схемы, а противофазные — между двумя проводами схемы.

К сожалению, параметры разработанного и собранного изделия часто не соответствуют ожидаемым. Это происходит из-за разброса параметров компонентов фильтра или их паразитных параметров, а также из-за наличия собственной ёмкости и индуктивности монтажа.

Актуальность проблемы напрямую связана с реальными задачами, которые приходится выполнять инженерно-техническим работникам предприятий. При выполнении данной работы перед авторами стояла задача выяснить

причины заниженного коэффициента затухания широкополосного помехоподавляющего фильтра, много лет успешно проходившего проверку по методике, утверждённой в ТУ на изделие. Однако, исследования фильтров с помощью современных методик выявили несоответствие их параметров заявленным. Установление причины данного несоответствия является непростой задачей, включающей в себя глубокий анализ конструкции изделия и применения косвенных методов оценки.

Модель идеального фильтра

Поставим цели исследования: выяснить причины несоответствия реального фильтра требуемым параметрам, предложить решения по технической модернизации изделия. Проблему планируется решать, совмещая физические испытания, измерения параметров реальных компонентов и компьютерное моделирование, что должно обеспечить качественный анализ взаимодействия компонентов.

Моделирование произведено в программе QUCS версии 0.0.19 [1]. Данный симулятор электрических цепей хорошо зарекомендовал себя при решении прикладных задач, продемонстрировав высокую достоверность результатов [2], в том числе при моделировании фильтров [3]. Симулятор является программой

с открытым исходным кодом, что представляет широкие возможности разработчику для настроек программы под свои нужды. Симулятор позволяет производить моделирование на постоянном токе и на переменном, в широком диапазоне частот. Следует отметить, что в программе QUCS можно измерять S-параметры четырехполюсника, что полезно для проектирования высокочастотных схем. Существенной особенностью, определившей выбор данной программы для наших задач, является возможность промоделировать схему многократно, учитывая разные номиналы одного и того же элемента, и построить семейство кривых, описывающих поведение схемы при различных значениях параметра. К недостаткам можно отнести тот факт, что невозможно проводить моделирование в реальном времени. Программа сначала определяет параметры схемы в различных точках, а затем строит эпюры токов и напряжений, заданные пользователем. Однако, для наших задач это несущественно.

Схема исходного фильтра представлена на рис. 1. По схемотехническому построению это трёхзвенный П-образный фильтр, защищающий от симметричных и несимметричных помех. Первое и третье звено фильтра предназначены для работы в низкочастотной части

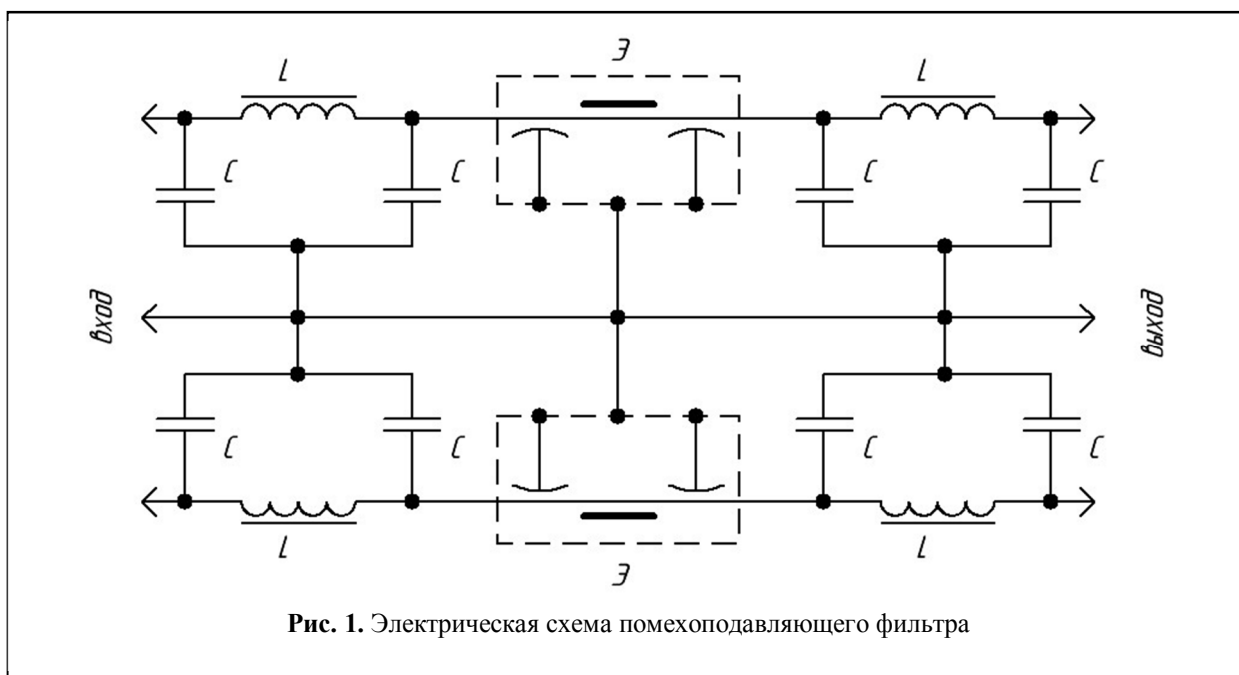


Рис. 1. Электрическая схема помехоподавляющего фильтра

диапазона. Элементы Э — керамические проходные помехоподавляющие фильтры типа Б14, предназначены для фильтрации высокочастотных помех. Коэффициент затухания в пределах рабочего диапазона должен быть не менее 60 дБ для частот 0,05; 0,1; 10; 30; 100; 400 МГц.

Для начала смоделируем фильтр с идеальными параметрами, чтобы иметь эталонную АЧХ для сравнения. Поскольку два канала фильтра идентичны, то нам, для оценки параметров, достаточно промоделировать только

один канал. Параметры конденсаторов известны, а параметры индуктивностей определены экспериментально, об их измерении будет дано объяснение ниже.

Модель фильтра представлена на рис. 2, а на рис. 3 — его АЧХ. Здесь не учитываются ни паразитные параметры компонентов, ни влияние элементов друг на друга. Следует отметить (и это будет справедливо почти для всей работы), что смоделированная АЧХ позволяет посмотреть лишь поведение четырёхполюсника на различных частотах, но не даёт

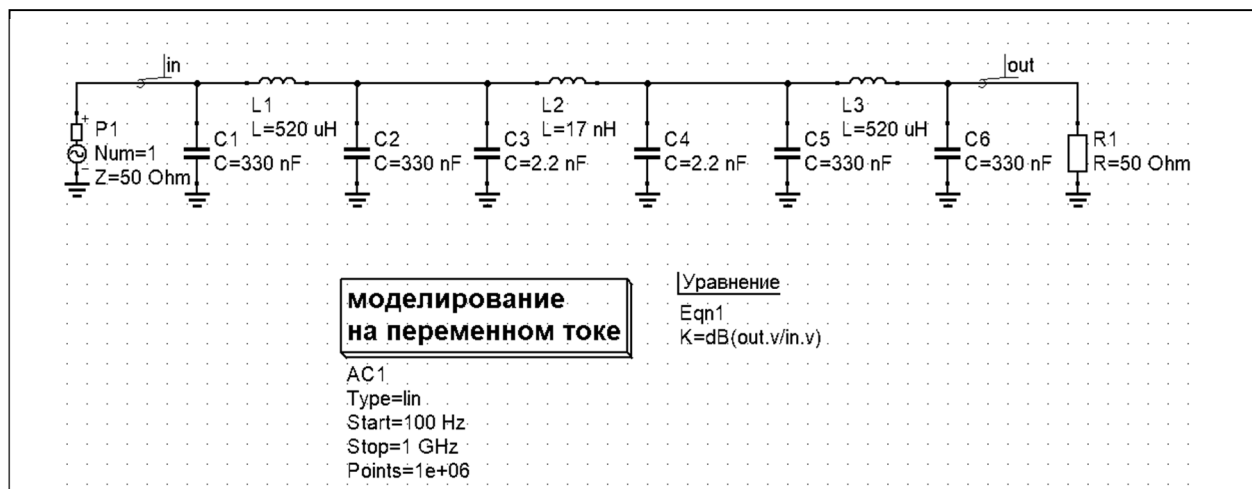


Рис. 2. Модель идеального фильтра

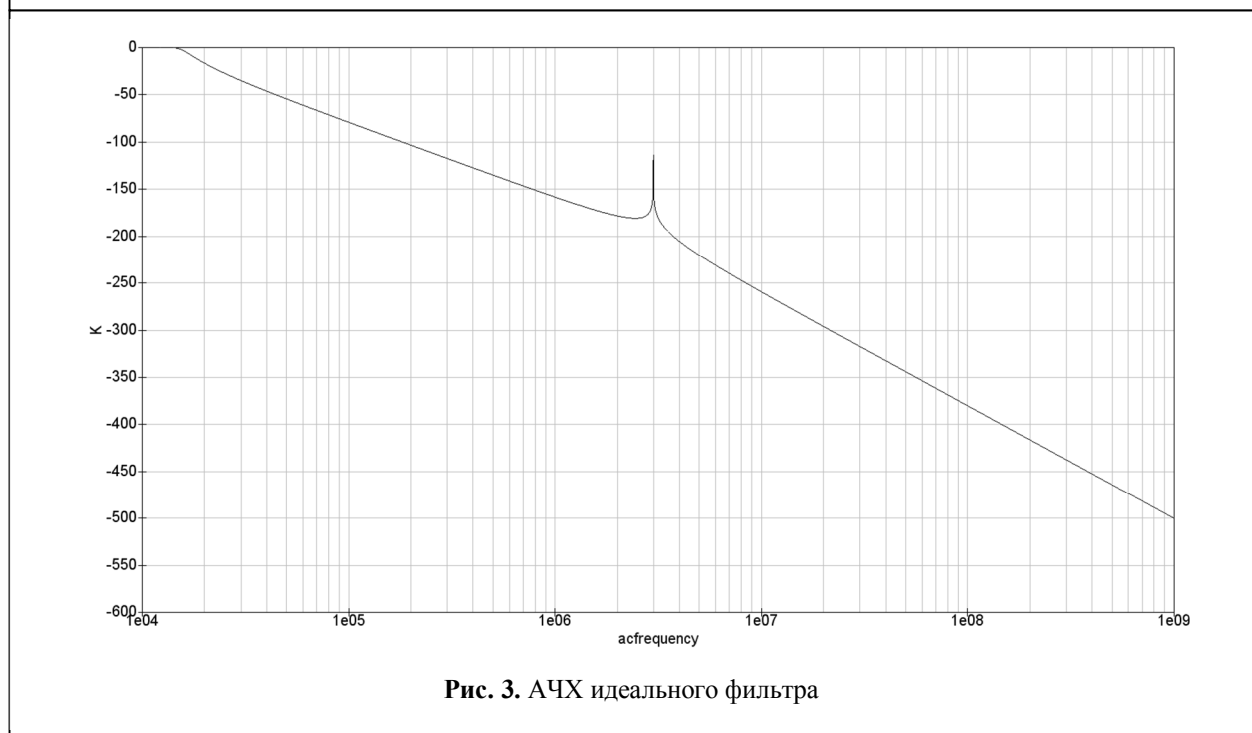


Рис. 3. АЧХ идеального фильтра

количественной оценки его затухания: данные получаются некорректными. Привязка к получаемым значениям коэффициента затухания возможна лишь на относительно низких частотах, где ещё не сказываются нелинейные параметры компонентов и их можно считать относительно идеальными. Практически, это частоты до 50–100 кГц.

Полос фильтр лежит между 10 и 20 кГц, всплеск на частоте 3 МГц обусловлен резонансом среднего звена. Для дальнейшего анализа необходимо дополнить модель паразитными параметрами, имеющими место в любом реальном компоненте.

Параметры реальных компонентов

В зависимости от типа конденсатора, его характеристик и диапазона частот реальный конденсатор может быть представлен различными эквивалентными схемами. В наиболее общем виде схема реального конденсатора представлена на рис. 4, а. Здесь L_C — индуктивность выводов и обкладок конденсатора; R_D — активное сопротивление диэлектрика; $R_{эпс}$ — эквивалентное последовательное сопротивление — активное сопротивление выводов и обкладок конденсатора.

Измерение собственной индуктивности представляет определённые трудности, по-

скольку она сильно зависит от длины выводов, взаимного расположения и ориентации их относительно прибора и его клеммных устройств. Достаточно при измерении незначительно изменить расположение проводов либо ориентацию выводов конденсатора, как можно получить новое значение индуктивности, отличающееся от ранее измеренного в несколько раз [4].

Значение сопротивления диэлектрика R_D для практических задач используется редко, поскольку является достаточно большой величиной, оперировать которой неудобно. Гораздо шире применяют меру потерь энергии в диэлектрике — тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Тогда можно записать выражение для активной мощности, рассеиваемой диэлектриком:

$$P_a = U^2 X_c \tan \delta \quad (1),$$

где U — напряжение, приложенное к конденсатору; X_c — реактивное сопротивление конденсатора на данной частоте.

Сам тангенс диэлектрических потерь для данной схемы замещения определяется как:

$$\tan \delta = \frac{1}{R_D \omega C} \quad (2),$$

где R_D — сопротивление диэлектрика;

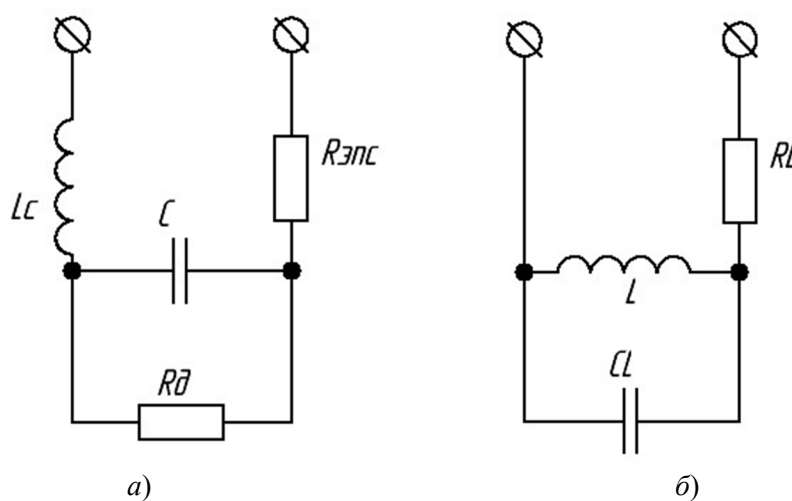


Рис. 4. Схемы замещения конденсатора а) и катушки индуктивности б)

$\omega = 2\pi f$ — циклическая частота; C — ёмкость конденсатора [4].

Несмотря на то, что $\tan \delta$ является частотозависимой величиной, влияет он только на активную мощность, рассеиваемую конденсатором. Поэтому для наших целей величину диэлектрических потерь, а вместе с ней и сопротивление диэлектрика можно не учитывать.

Схема реальной катушки индуктивности представлена на рис. 4, б. Реальная катушка характеризуется, помимо собственной индуктивности, паразитной межвитковой и межвыводной ёмкостью C_L и активным сопротивлением обмотки R_L . Причём, для низкочастотных катушек эти параметры достигают большой величины, из-за чего пренебречь ими не представляется возможным.

Измерение паразитных параметров компонентов

Не все паразитные параметры можно измерить непосредственно. К таким параметрам относятся эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора $R_{экс}$ и ёмкость катушки C_L .

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора обычно составляет доли Ом для конденсаторов с высокой ёмкостью и низким напряжением, и может достигать двух или более Ом для элементов с низкой ёмкостью и высоким напряжением.

Для используемых в исследуемом помехоподавляющем фильтре комбинированных конденсаторов К75-10 эквивалентное последовательное сопротивление будет складываться из:

$$R_{экс} = R_{об} + R_г \quad (3),$$

где $R_{об}$ — активное сопротивление обкладки; $R_г$ — активное сопротивление выводов

На практике эквивалентное последовательное сопротивление измеряется путём подачи прямоугольной волны с частотой около 50 кГц и амплитудой, равной нескольким десяткам вольт на испытуемый конденсатор, который

последовательно соединен с низкоомным резистором. Напряжение переменного тока, возникающее на этом резисторе, измеряется и отображается на индикаторе.

Измерение паразитной ёмкости катушек индуктивности является более нетривиальной задачей. В зависимости от частоты, на которой работает катушка, приходится использовать различные методы измерения. Один из способов определения паразитной ёмкости — определение добротности колебательного контура, образованного индуктивностью и её паразитной ёмкостью. Как известно, добротность контура (Q) — мера идеальности колебательного контура, показывающая, во сколько раз импеданс колебательного контура изменяется на резонансной частоте по сравнению с низкочастотным значением. У идеального параллельного колебательного контура на резонансной частоте импеданс стремится к бесконечности, у реального — увеличится в Q раз. Величина добротности для параллельного резонансного контура в общем случае определяется как:

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что расчёт добротности конкретного контура является непростой задачей, зависящей от многих параметров [5–11].

Практически же измерить добротность можно с помощью специального прибора — измерителя добротности. В работе использовался измеритель добротности Е4-11. Он работает в диапазоне частот 30–300 МГц и измеряет значения добротности от 10 до 1000. Удобством его является непосредственный отсчёт значений по шкале измерительной головки. Данный прибор позволяет также проводить измерения индуктивности катушек и (что для нас важно) паразитной ёмкости индуктивностей. Конкретные методики измерения изложены в техническом описании измерителя добротности Е4-11 (Е4-11. Измеритель добротности. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.728.002 ТО), они при-

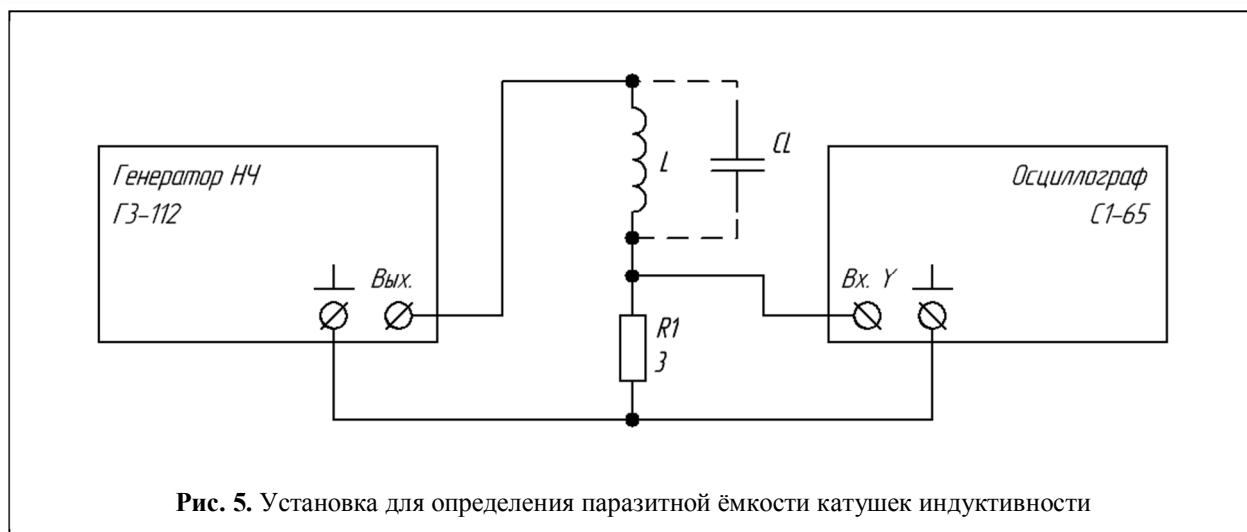


Рис. 5. Установка для определения паразитной ёмкости катушек индуктивности

менены без каких-либо изменений или упрощений. Отметим лишь то, что для минимальной погрешности измерений выводы катушки должны подсоединяться непосредственно к клеммам измерителя без каких-либо промежуточных проводов.

Авторами была сделана выборка из партии фильтров Б14 в количестве 36 штук и измерены их параметры. Средние значения получились следующими: паразитная ёмкость — 1,67 пФ, индуктивность фильтра — 17 нГн. Полученные значения будут использованы в дальнейшем для моделирования.

Измерить же паразитную ёмкость других катушек фильтра с помощью измерителя добротности не представилось возможным, поскольку резонансная частота дросселей много ниже рабочей частоты измерителя Е4-11. Здесь лучше работает метод непосредственного измерения резонансной частоты. Поскольку катушка индуктивности со своей паразитной ёмкостью представляет параллельный колебательный контур, то для неё можно записать:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_L}}, \quad (5)$$

где C_L — паразитная ёмкость. Определив резонансную частоту катушки и измерив её индуктивность, вычисляют её паразитная ёмкость.

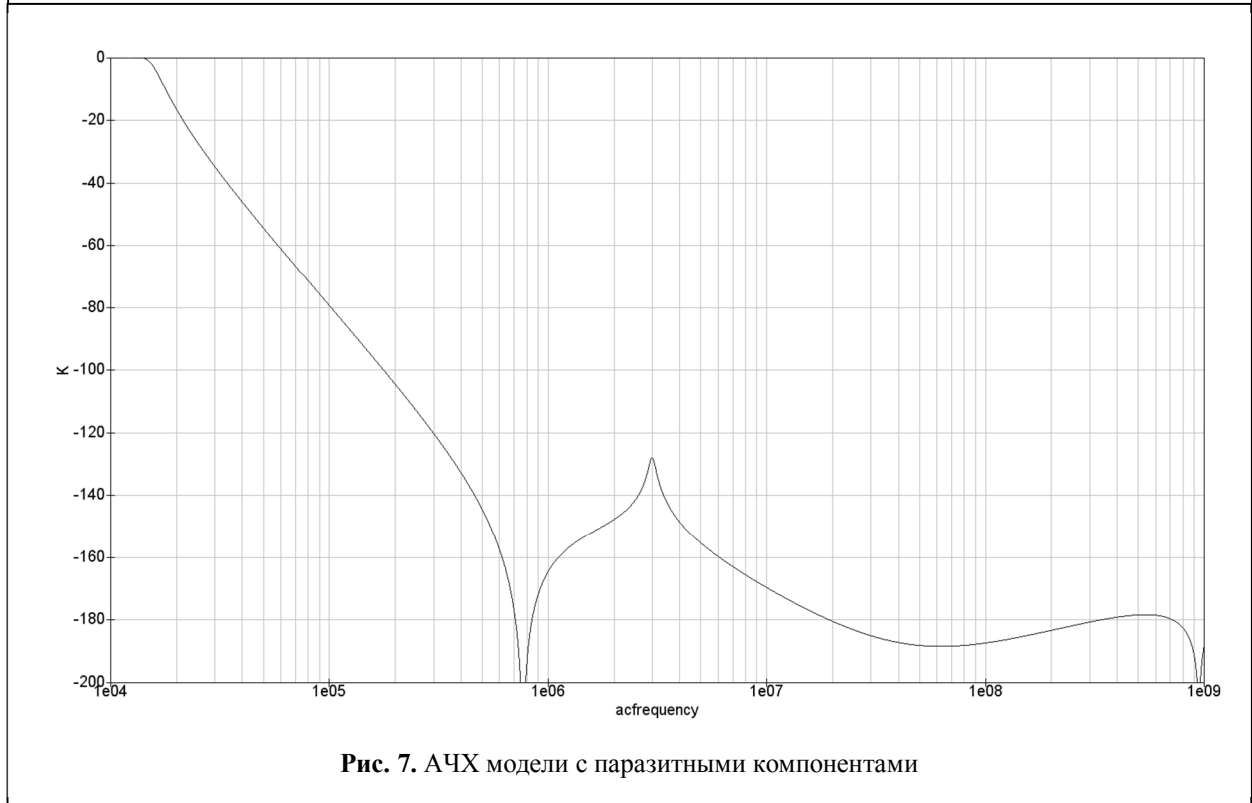
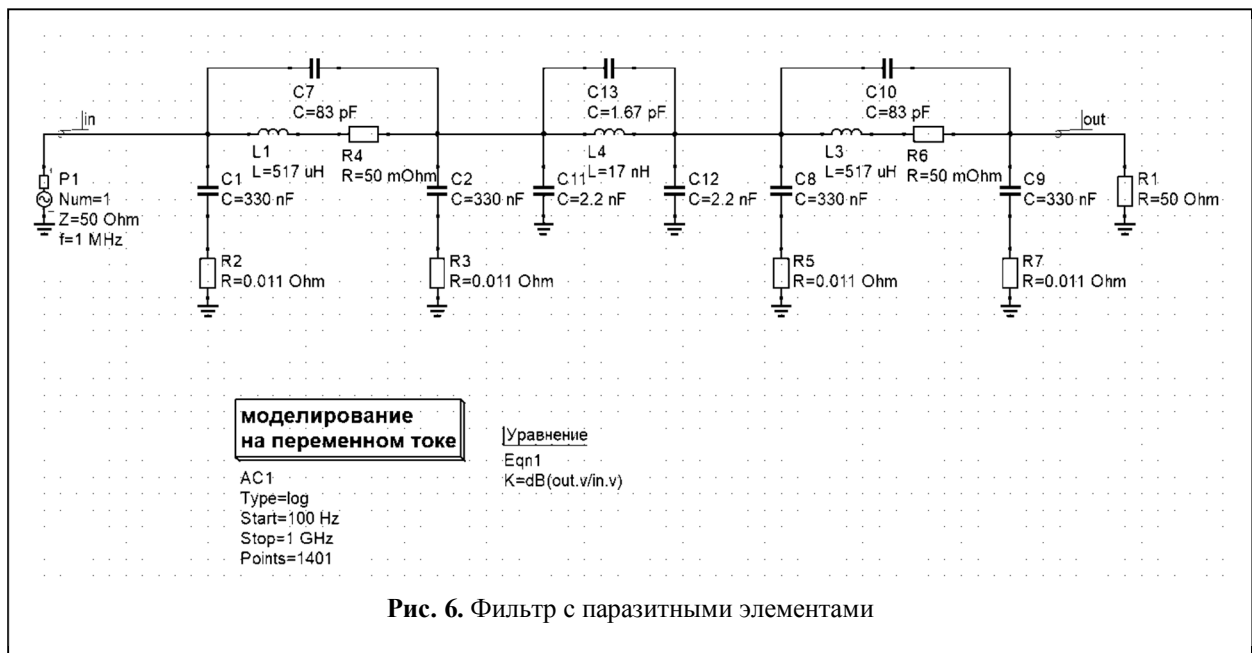
Схема измерительной установки представ-

лена на рис. 5. Колебательный контур питается от генератора низкочастотных колебаний с частотой, регулируемой в диапазоне 10 Гц – 10 МГц. В качестве индикатора резонанса используется электронно-лучевой осциллограф. Индикатор резонанса подключен к датчику тока — резистору, включенному последовательно с контуром. Резонанс определяется визуально, по минимальной амплитуде колебаний на экране осциллографа. Поскольку точность визуального контроля невысока, в установке нет частотомера для точного определения частоты резонанса. резонансная частота считывается непосредственно с визира ручки регулировки частоты.

Ёмкость измерялась у 20 дросселей, среднее значение оказалось равным 82,6 пФ.

Модель фильтра с паразитными параметрами

Учитывая всё вышесказанное схема фильтра примет вид, изображённый на рис. 6. В этой модели учтены паразитные ёмкости низкочастотных катушек и керамического фильтра, собственное сопротивление низкочастотных катушек и ЭПС конденсаторов. Установки модели: входное и выходное сопротивление 50 Ом, диапазон моделирования 10 кГц – 1 ГГц, количество точек для обчёта — 1401. АЧХ такой модели изображена на рис. 7 и су-



щественно отличается от идеальной модели фильтра.

Выше отмечалось, что в низкочастотном диапазоне данные по затуханию можно считать правдоподобными. Поэтому нужно отметить, что на частоте 50 кГц коэффициент затухания меньше требуемых 60 дБ. Этот участок показан в увеличенном масштабе на рис. 8.

Увеличить затухание на данной частоте можно, увеличив ёмкость конденсаторов или индуктивность катушек низкочастотных звеньев. Поскольку в реальной конструкции мы ограничены габаритами корпуса, то проще увеличить индуктивность катушек, домотав некоторое количество витков на магнитопровод, чем поставить более габаритные конден-

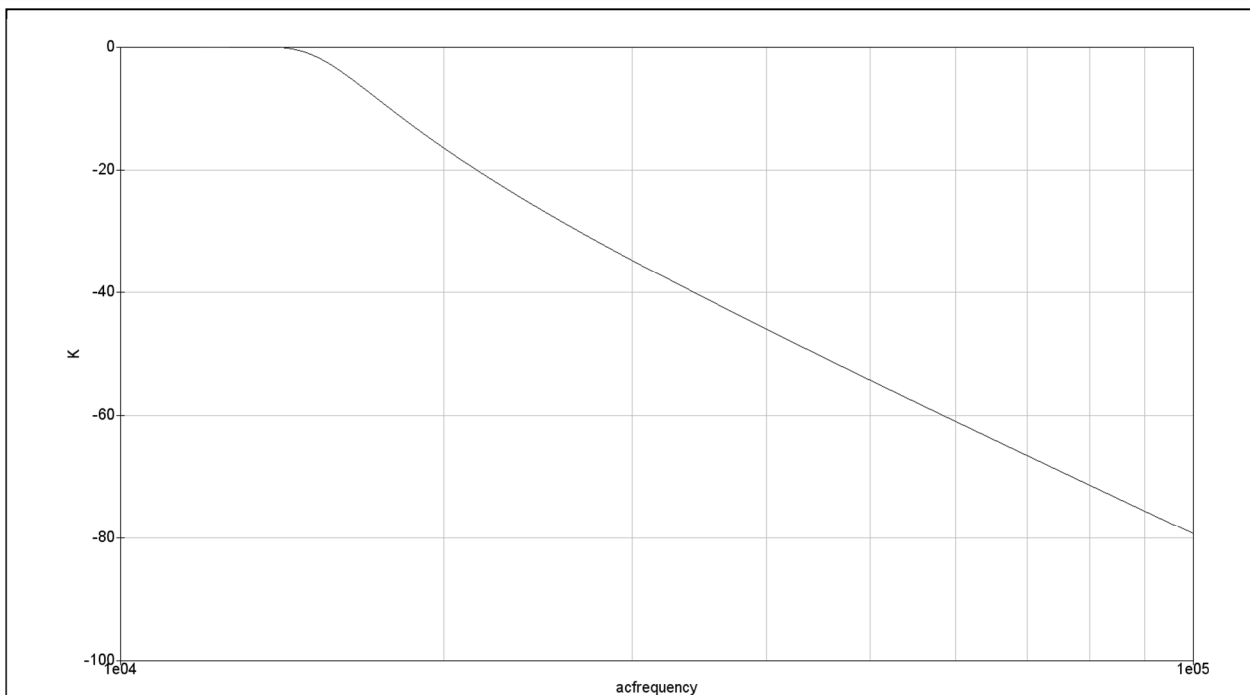


Рис. 8. АЧХ модели в диапазоне 10–50 кГц

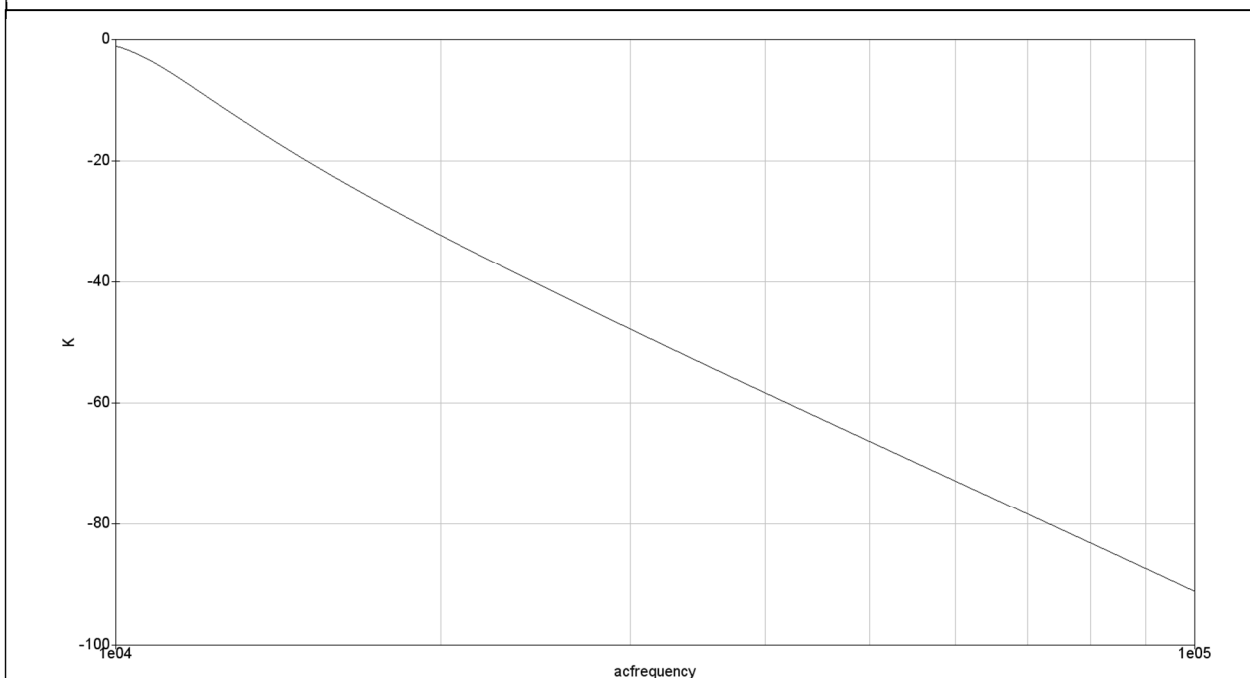


Рис. 9. АЧХ модели с изменённой индуктивностью катушек в диапазоне 10–50 кГц

саторы. Увеличим индуктивность до 1000 мкГн (рис. 9).

Теперь коэффициент затухания стал равным –66 дБ, что входит в допустимый диапазон.

Для поиска причины несоответствия коэффициента затухания требуемому на высоких

частотах, построим АЧХ фильтра в режиме короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ), чтобы понять, как влияет импеданс нагрузки на его свойства (рис. 10). Настройки моделирования: диапазон 100 Гц – 1 ГГц, количество расчётных точек — 701. Сопротивле-

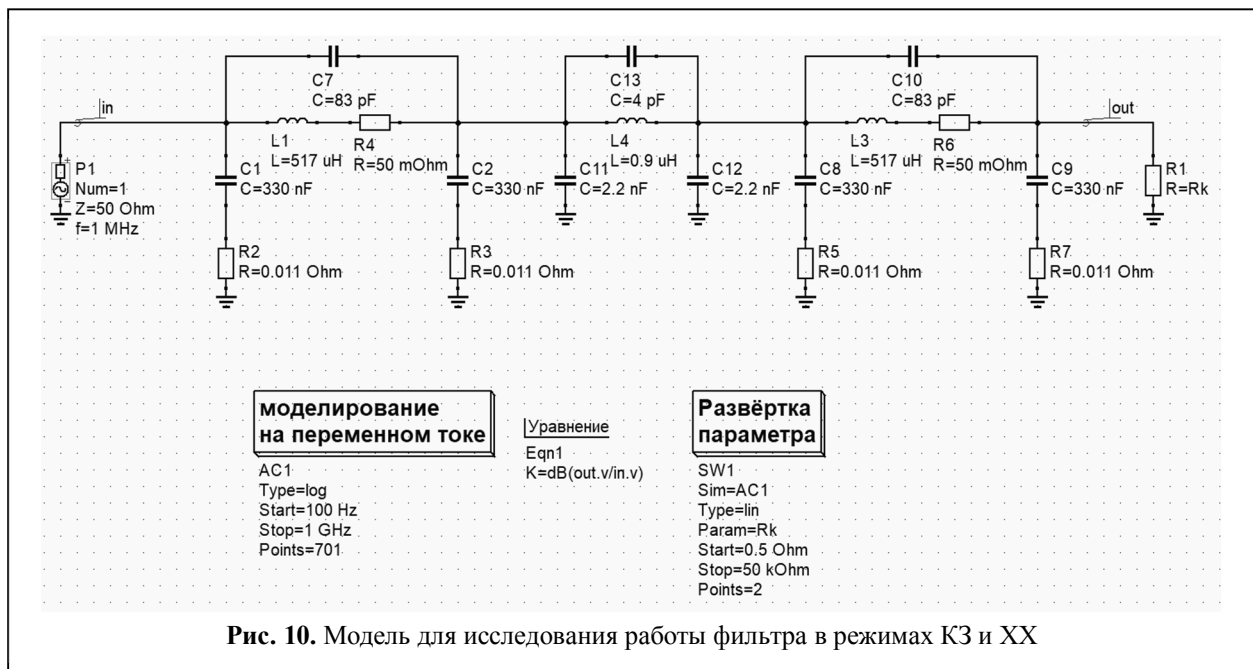


Рис. 10. Модель для исследования работы фильтра в режимах КЗ и ХХ

ние меняется с помощью развёртки параметра. Зададим два значения: 0,5 Ом для КЗ и 50 кОм для ХХ.

При поиске возможных решений проблемы несоответствия параметров было выдвинуто предположение о существенном влиянии ёмкости керамических фильтров Б14 на коэффициент затухания. Поэтому предприятием-изготовителем была произведена отбраковка всех имеющихся Б14 по ёмкости. В результате, в изделия были установлены фильтры с большими значениями ёмкости.

По аналогии с предыдущим анализом, проанализируем, насколько сильно влияет ёмкость керамического фильтра в пределах допуска на частотную характеристику изделия. Параметры моделирования те же, что и при исследовании режимов КЗ и ХХ. В качестве развёртываемого параметра берётся ёмкость керамического фильтра от 1,8 до 2,8 нФ с шагом 200 пФ (всего шесть значений).

В результате, получилось шесть частотных характеристик, полностью совпадающих друг с другом. Можно сделать вывод, что изменение ёмкости фильтра Б14 в пределах допуска вообще не влияет на частотную характеристику изделия.

В данной части было исследовано влияние только паразитных параметров компонентов, но не учитывались особенности конструкции готового изделия. В следующей части статьи проанализируем в модели паразитные элементы конструкции.

Влияние элементов конструкции на частотную характеристику

В области частот, близких к СВЧ-диапазону (100–300 МГц) начинают проявляться излучающие свойства элементов конструкции. Так, металлический винт, находящийся вблизи катушки индуктивности, превращается в штыревую антенну, начиная отбирать часть энергии у катушки и излучать её в окружающее пространство. Если винт проходит через несколько экранированных отсеков устройства, то он становится проводником электромагнитного поля и, как следствие, помех. Экранирование становится малоэффективным.

Также, мешающими нормальной работе устройства становятся элементы конструкции, которые можно считать короткозамкнутыми витками (крепёжные скобы, металлические хомуты и т.д.). Они, по аналогии с антеннами, забирают энергию у индуктивных элементов и переизлучают её. Ещё одной опасностью ко-

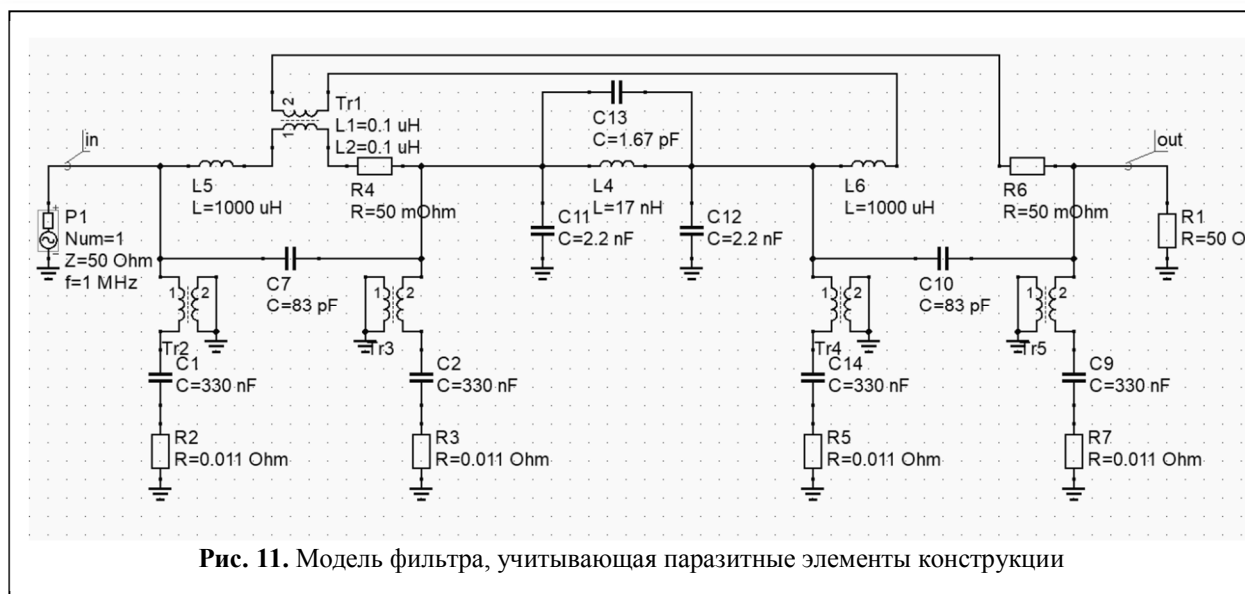


Рис. 11. Модель фильтра, учитывающая паразитные элементы конструкции

роткозамкнутых витков является снижение добротности находящихся вблизи индуктивных элементов, из-за чего ухудшаются резонансные свойства колебательных контуров и, соответственно, их заградительные свойства. Поэтому минимизация в конструкции элементов, потенциально являющихся излучателями энергии, является одной из основных при конструировании высокочастотной техники.

Рассматриваемый в данной статье фильтр состоит из двух экранированных стенками и перегородкой отсеков в каждом из которых находится по два низкочастотных П-образных звена: половина верхнего по схеме (рис. 1) канала и нижнего. Отсеки соединяются через керамический фильтр Б14. Катушки индуктивности каждого канала механически соединяются через общий винт, проходящий через оба отсека. Низкочастотные конденсаторы закреплены металлическими скобами на перегородке.

Паразитными элементами данной конструкции, безусловно, можно считать общие крепёжные винты для катушек индуктивности. Помимо вышеописанной функции антенны, винт можно рассматривать дополнительно как общий магнитопровод для двух катушек индуктивности. Всё это приводит к наличию обходного пути для помех вокруг керамического фильтра, из-за чего коэффициент затухания падает. Также, паразитными можно назвать

металлические скобы, удерживающие конденсаторы, поскольку они являются короткозамкнутыми витками, пусть и замкнутыми на землю.

Учитывая все вышесказанное, произведём изменение созданной нами модели так, чтобы оценить влияние элементов конструкции на частотные характеристики.

Изменённая модель показана на рис. 11. Для создания общего магнитного поля между двумя катушками последовательно с ними включён трансформатор Tr1 с практически идеальными характеристиками: малой индуктивностью обмоток и коэффициентом трансформации, равным единице. Последовательно с низкочастотными конденсаторами включены трансформаторы Tr2–Tr5 с параметрами, аналогичными Tr1. Первичная обмотка их имитирует индуктивность обкладок конденсатора, вторичная — короткозамкнутый виток крепёжной скобы.

На рис. 12 представлена частотная характеристика новой модели. Как можно видеть, в полосе частот примерно от 6 до 150 МГц затухание резко падает и становится намного меньше требуемого коэффициента затухания в –60 дБ. В других областях АЧХ затухание также значительно ослабло, хотя и осталось в допустимых пределах.

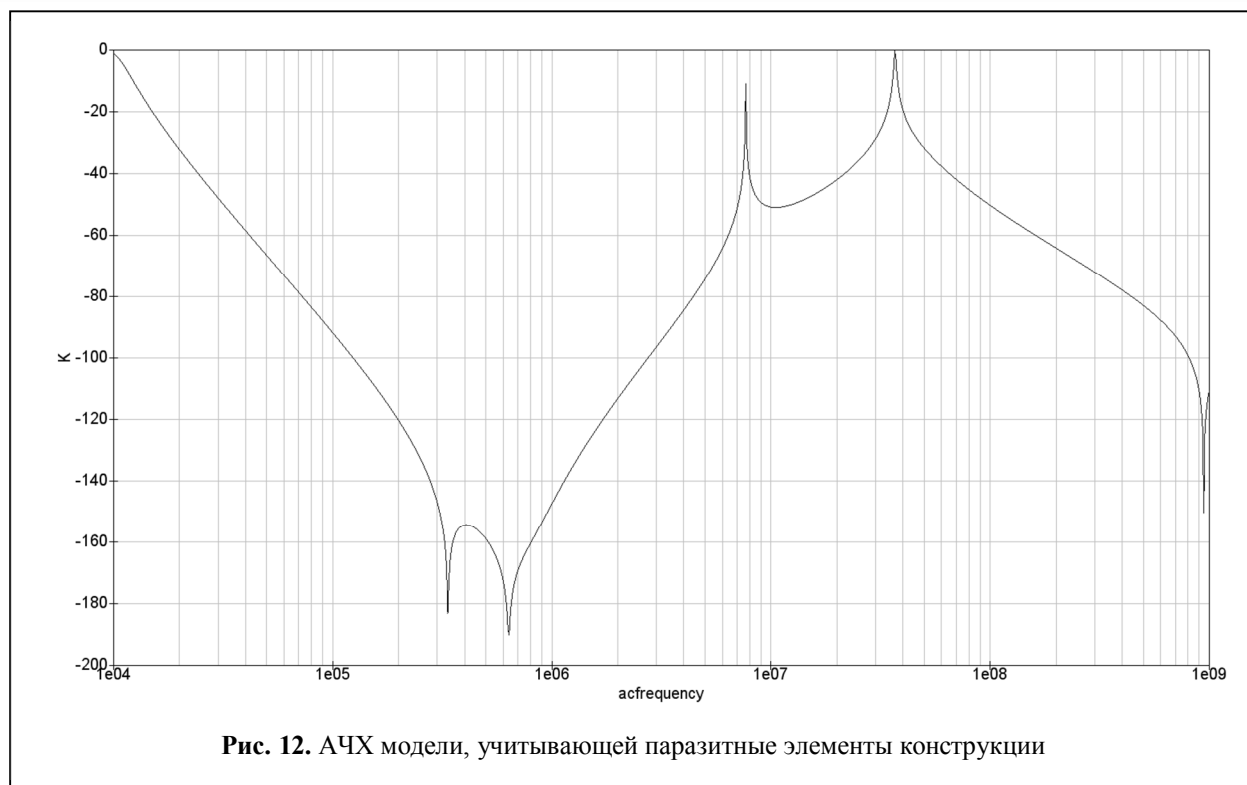


Рис. 12. АЧХ модели, учитывающей паразитные элементы конструкции

Заключение

Таким образом, было установлено, что исследуемый фильтр по своим параметрам не обеспечивает необходимого затухания в низкочастотной и высокочастотной частях диапазона. Для увеличения коэффициента затухания в нижней части диапазона требуется увеличить индуктивность низкочастотных дросселей. Параметры емкостей и керамических фильтров не влияют на работу устройства. Кроме того, было обнаружено, что заметно ухудшают характеристики фильтра крепления конденсаторов, представляющие собой короткозамкнутый виток, и крепления НЧ дросселей, обеспечивающих паразитную емкостную связь между отсеками.

Для оптимизации электрофизических характеристик необходимо изменить способ крепления компонентов. Этого можно достичь, заменив металлический штырь крепления дросселя на полиамидный. Крепежные скобы для дросселей необходимо выполнять из диэлектрического материала.

Литература

1. Кечев Л.Н., Крючков Н.М., Кузнецов В.В. Симулятор QUCS: основные возможности // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2015. Т. 1. С. 398–400
2. Драч В.Е., Корчикова А.Е. Повышение уровня стабилизации драйвера светодиодов // Вестник инженерной школы Дальневосточного Федерального университета. 2016. №1(26). С. 10–16
3. Дубинина М.С., Рыжов С.В., Крючков Н.М., Кузнецов В.В. Инструмент для синтеза фильтра Лежандра и катушек индуктивности в САПР QUCS // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 4 (63). С. 42–47.
4. Эпштейн С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Энергия, 1971. 220 с.
5. Скрипников Ю.Ф. Колебательный контур. М: Энергия, 1970. 128 с.
6. Черепанов В.П., Посысаев Е.И. Защита радиоэлектронной аппаратуры от электрических перегрузок. М: РадиоСофт, 2010. 218 с.
7. Золин Е.В. Электромагнитная совместимость в сетевых помехоподавляющих фильтрах: статья // Энергосбережение и инновационные технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, 20 ноября 2015 г. – Тюмень: Издательство Тюменского индустриального университета, 2015

8. Гурин В.К., Павловский В.А., Юрченко О.Н. Собственные и взаимные паразитные параметры элементов помехоподавляющих фильтров для источников электропитания ключевого типа // Техническая электродинамика. 2012. №2. С. 119–120.

9. Пат. РФ № 177627 U1. Сетевой помехоподавляющий фильтр / Лепеха Ю.П., Саксаганский О.В. Заявл. 15.08.2017, опуб. 02.03.2018.

10. Патент РФ 132656 U1. Фильтр сетевой помехоподавляющий / Баранов И.А., Петров С.Н. Заявл. 27.02.2013, опуб. 20.09.2013.

11. Сергеев В.В., Замулин О.Л., Шушпанов Д.В., Павлов А.В. Расчет сетевого фильтра радиопомех для источника бесперебойного питания // Практическая силовая электроника. 2011. № 2 (42). С. 23–36.

Поступила 3 июня 2020 г.

English

PARAMETER OPTIMIZATION OF BROADBAND NOISE-SUPPRESSION FILTERS

Vladimir Evgenyevich Drach — PhD, Associate Professor, Kaluga Affiliated Branch of "Bauman Moscow State Technical University (National Research University of technology)".

E-mail: drach@bmstu-kaluga.ru

Pavel Vjacheslavovich Kondrashov — Graduate Student, Kaluga Affiliated Branch of "Bauman Moscow State Technical University (National Research University of technology)".

E-mail: p.kondrashov.radio@yandex.ru

Mikhail Aleksandrovich Savvin — Graduate Student, Kaluga Affiliated Branch of "Bauman Moscow State Technical University (National Research University of technology)".

E-mail: 79108644148@yandex.ru

Address: 248000, Russian Federation, Kaluga, Bazhenov str., 2.

Abstract: Currently, electronics developers are facing acute problems of electromagnetic compatibility (EMC). They comprise both the external noise effect on the device operation, and the noise effect on external equipment emitted by the device. Most often, EMC problems are solved empirically based on a ready-made product, and the cost value to solve these problems is comparable to the development cost. That is why EMC problem solution is a timely task at initial stages of development. The article considers methods to optimize the design of mass-produced noise-suppression filter in relation to EMC. This filter attenuation failed to meet requirements of the engineering documentation, and this problem was identified due to using current measuring equipment at mass production stage. The simulation was performed in Qucs 0.0.19 program, which enables to construct a set of curves describing the behavior of the circuit at different values of element parameters, and the noise-suppression filter was simulated. Equivalent circuits were used to evaluate the effect of parasitic parameters that reduce attenuation ratio. The simulation was performed in 100 Hz – 1 GHz frequency range. As a result of the conducted research, the following conclusions can be made:

- Consideration of elements' parasitic parameters initiates a significant change in the form of error-free amplitude-frequency response of noise-suppression filter;
- Capacity value of feed-through capacitor in the considered frequency range does not make much a difference for the attenuation by the filter;
- The value of coil inductance most influences filter output response in low frequency range;
- Radiating properties of structural components start to manifest in high-frequency range, the effect of which on attenuation by the filter cannot be ignored.

Thus, it became possible to refute the original proposal of eliminating nonconformity of mass-produced filters to engineering documentation, which consisted in using feed-through capacitors with the highest capacity. Research findings made it clear that the task set before this work's authors at manufacturing site can be solved most effectively by increasing coils inductance from 517 μH up to 1000 μH as well as by upgrading fasteners of radio-electronic components that comprise the filter.

Keywords: noise-suppression filter, parasitic parameters, Qucs, amplitude-frequency response, equivalent circuit.

References

1. Kechiev L.N., Kryuchkov N.M., Kuznetsov V.V. Simulation of QUCS: basic capabilities. Innovations based on information and communication technologies. 2015. Vol. 1. Pp. 398–400
2. Drach V.E., Korchikova A.E. Raising the level of stabilization of the LED driver. Bulletin of the engineering school of the Far Eastern Federal University. 2016. No. 1(26). Pp. 10–16

3. *Dubinina M.S., Ryzhov S.V., Kryuchkov N.M., Kuznetsov V.V.* Tool for the synthesis of the Le Gendra filter and inductors in CAD QUCS. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2017. No. 4 (63). Pp. 42–47.
4. *Epshtein S.L.* Measuring the characteristics of capacitors. Ed. 2nd, add. and reprint. Leningrad: Energiya, 1971. 220 p.
5. *Skripnikov Yu.F.* Oscillatory circuit. Moscow: Energiya, 1970. 128 p.
6. *Cherepanov V.P., Posysaev E.I.* Protection of radioelectronic equipment from electrical overload. Moscow: RadioSoft, 2010. 218 p.
7. *Zolin E.V.* Electromagnetic compatibility in network noise-suppressing filters: article. *Energy Saving and Innovative Technologies: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Young Scientists and Specialists*, November 20, 2015-Tyumen: Tyumen Industrial University Press, 2015
8. *Gurin V.K., Pavlovsky V.A., Yurchenko O.N.* Proper and mutual parasitic parameters of elements of noise-suppressing filters for power supply sources of key type. *Technichna elektrodynamika*. 2012. No. 2. Pp. 119–120.
9. RU Patent No. 177627 U1. Network jamming-pressure filter. *Lepecha Yu. P., Saksagansky O.V.* Appl. 15.08.2017, pub. 02.03.2018.
10. RU Patent No. 132656 U1. Jamming-pressure network filter. *Baranov I.A., Petrov S.N.* Appl. 27.02.2013, pub. 20.09.2013.
11. *Sergeev V.V., Zamulin O.L., Shushpanov D.V., Pavlov A.V.* Calculation of the network filter of radio interference for an uninterruptible power supply. *Practical power electronics*. 2011. No. 2 (42). Pp. 23–36.