

На главную <http://ivativ.narod.ru/index.html>

Иноземцев В.А.

Демонстрационный эксперимент с колебательным контуром

В настоящей работе приводятся краткие описания демонстраций с колебательным контуром на лабораторных занятиях по радиоэлектронике. В большинстве демонстраций рассматриваются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров с параллельным колебательным контуром и фильтров с последовательным контуром. Фильтр удобно рассматривать как четырехполюсник. Для наблюдения АЧХ четырехполюсника на экране осциллографа используют генератор качающейся частоты. Генератор MXG-9802A может работать в режиме источника синусоидальных колебаний, источника прямоугольных импульсов напряжения, источника треугольных импульсов напряжения и в режиме генератора качающейся частоты. В составе генератора качающейся частоты MXG-9802A имеется генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) и генератор, управляемый напряжением (ГУН). ГЛИН вырабатывает напряжение, линейно изменяющееся со временем до максимального значения, а затем это напряжение резко уменьшается до нуля (пилообразное напряжение). ГУН вырабатывает напряжение, частота которого линейно зависит от величины управляющего напряжения. Управляющее напряжение на вход ГУН подается либо от внутреннего ГЛИН, либо от внешнего источника через гнездо «вход VCF» функционального генератора MXG-9802A. В соответствии с паспортом прибора на вход VCF подается напряжение в диапазоне от 0 до 10 вольт. Форма напряжения на выходе генератора MXG-9802A определяется нажатой кнопкой из группы кнопок формы сигнала. Для исследования АЧХ четырехполюсников будем использовать синусоидальное напряжение.

Для наблюдения на экране осциллографа АЧХ четырехполюсника собирают экспериментальную установку по схеме, приведенной на рисунке 1. Сигнал с ГЛИН одновременно подается на управляющий вход ГУН и на вход X осциллографа. Отклонение луча по оси Y пропорционально частоте сигнала, подаваемого на вход исследуемого четырехполюсника. Синусоидальный сигнал с выхода ГУН подается на вход исследуемого четырехполюсника, а сигнал с выхода четырехполюсника подается на вход Y осциллографа.

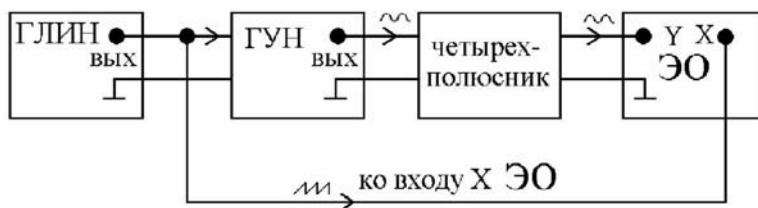


Рис. 1

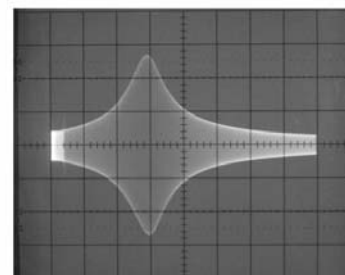


Рис. 2

Если в качестве исследуемого четырехполюсника взять фильтр с параллельным колебательным контуром по схеме рис. 13, то на экране осциллографа будет сигнал, показанный на рисунке 2. Это зависимость двойной амплитуды сигнала на выходе четырехполюсника от частоты. Разделив, полученное на экране изображение, вдоль оси «частота» (ось X осциллографа) пополам и взяв верхнюю огибающую, получим АЧХ четырехполюсника.

В демонстрациях с колебательным контуром были использованы два диапазона частоты генератора MXG-9802A: диапазон X100K и диапазон X1M. На этих диапазонах было проведено исследование зависимости частоты колебаний на выходе генератора MXG-9802A от величины управляющего напряжения, подаваемого на вход VCF от источника постоянного напряжения ИПС-1. Управляющее напряжение измерялось комбинированным цифровым прибором Ц4313.

Зависимость частоты колебаний на выходе генератора MXG-9802A от величины управляющего напряжения, подаваемого на вход VCF, для диапазона X100K приведена на рисунке 3. В генераторе MXG-9802A нажата кнопка X100K из группы кнопок выбора диапазона частоты. В соответствии с паспортом прибора максимальная частота выходного напряжения в этом случае равна 200 кГц.

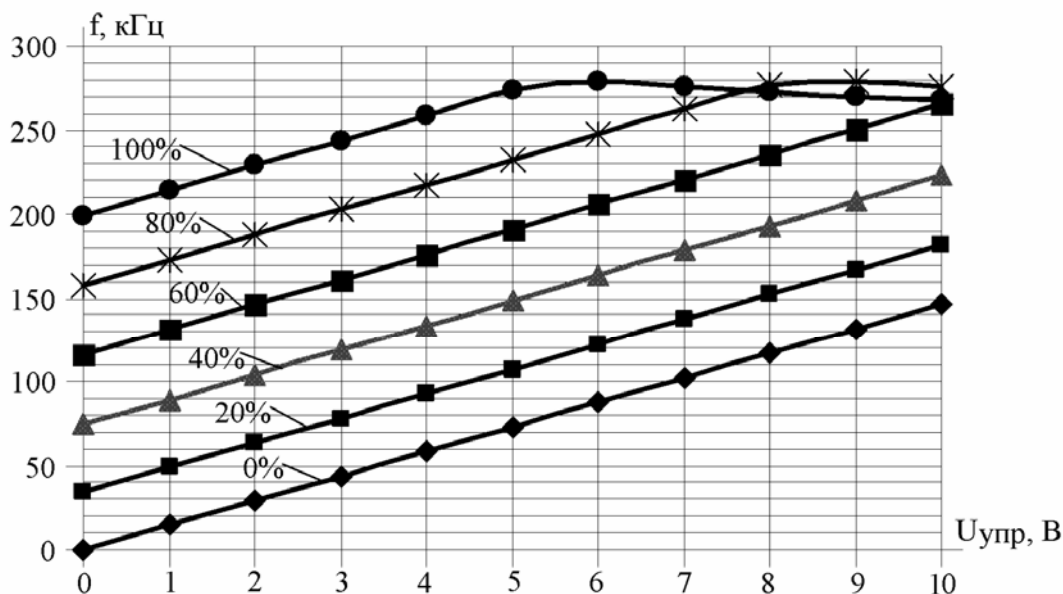


Рис. 3

Зависимости сняты при различных положениях поворотного переключателя частоты. 0% соответствует положению поворотного переключателя частот MIN, а 100% соответствует положению поворотного переключателя частот MAX. Из графиков, приведенных на рисунке 3, следует, что для диапазона X100K линейная зависимость частоты сигнала от управляющего напряжения наблюдается до частоты 250 кГц.

Для работы с генератором MXG-9802A удобно иметь внешний генератор линейно изменяющегося напряжения. Принципиальная схема самодельного генератора линейно изменяющегося напряжения ГЛИН приведена на рис. 4.

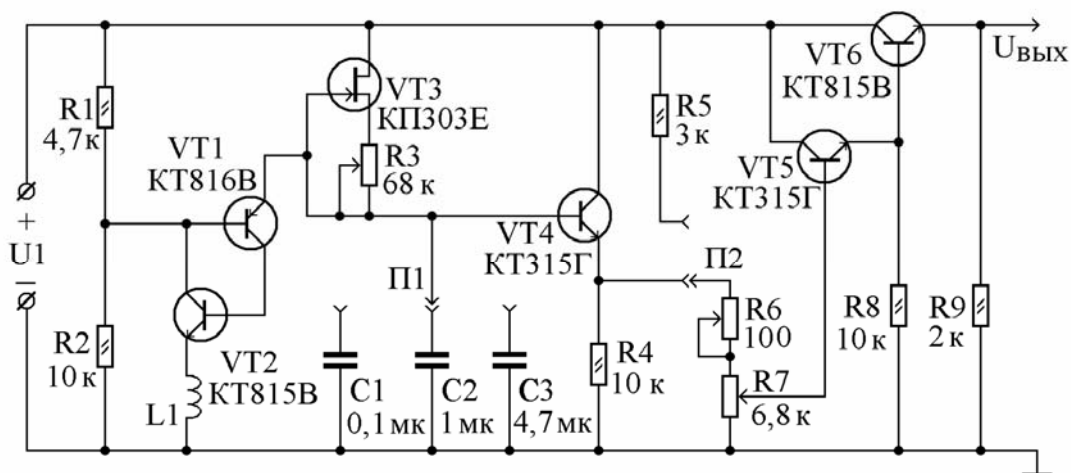


Рис. 4

ГЛИН питается от источника постоянного напряжения U1 (15В). На транзисторах VT1 и VT2 собран аналог динистора. Делитель напряжения на резисторах R1 R2 обеспечивает необходимую амплитуду пилообразного напряжения. Транзистор VT3 и резистор R3 образуют стабилизатор тока зарядки одного из конденсаторов C1, C2, C3. Ток стабили-

зации можно регулировать переменным резистором, R3. Конденсаторы переключаются с помощью перемычки П1, указанной на схеме. Период вырабатываемых импульсов зависит от подключенного конденсатора С1 - С3. При подключенном конденсаторе С1 период изменяется резистором R3 в пределах 4,7 – 23,5 мс. При подключенном конденсаторе С2 период вырабатываемых импульсов изменяется в пределах 31,5 – 148 мс. При подключенном конденсаторе С3 период вырабатываемых импульсов изменяется в пределах 120 – 1200 мс.

Пусть с помощью перемычки П1 подключен конденсатор С2. По мере зарядки конденсатора С2 потенциал эмиттера транзистора VT1 относительно общего провода увеличивается. Потенциал базы транзистора VT1 относительно общего провода определяется делителем напряжения на резисторах R1, R2 и напряжением источника питания U1. Как только потенциал эмиттера транзистора VT1 превысит на 0,5 вольта потенциал базы этого транзистора, транзисторы VT1, VT2 лавинообразно откроются и конденсатор С2 быстро разрядится. Катушка индуктивности L1 обеспечивает закрытие указанных транзисторов.

Транзистор VT4 и резистор R4 представляют собой эмиттерный повторитель, обладающий большим входным и малым выходным сопротивлениями. На транзисторах VT5, VT6 также собран эмиттерный повторитель. Величина выходного напряжения регулируется грубо переменным резистором R7 и плавно переменным резистором R6. Резистор R9 обеспечивает начальный ток нагрузки ГЛИН. Если перемычка П2 установлена в верхнее положение, то на выходе ГЛИН будет постоянное напряжение, величина которого изменяется переменными резисторами R6 и R7. Это необходимо для градуировки входа X осциллографа по частоте. Сигнал с выхода ГЛИН одновременно подается на управляющий вход VCF генератора MXG-9802A и на вход X осциллографа GOS-620.

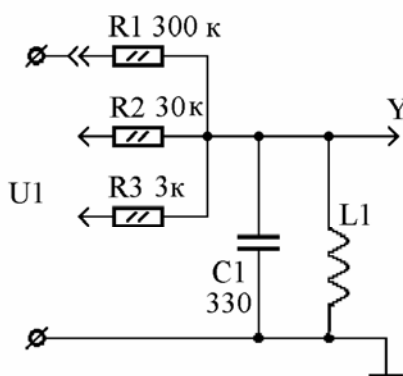


Рис. 5

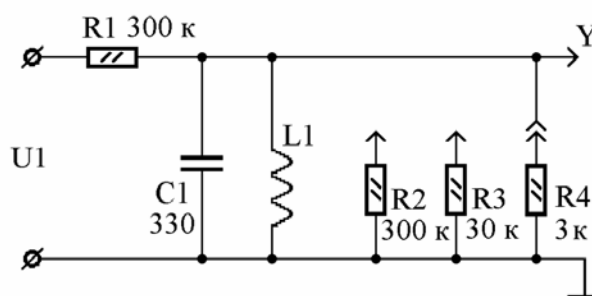


Рис. 6

Рассмотрим градуировку входа X осциллографа по частоте. Переключаем перемычку П2 ГЛИН в верхнее положение. Резистором R7 устанавливаем выходное напряжение равным нулю. Органами управления осциллографа смещаем луч по горизонтали на необходимое начальное положение. Начальную частоту качания устанавливаем поворотным переключателем частоты генератора MXG-9802A, например 110 кГц. Затем переменными резисторами R6 и R7 устанавливаем верхнюю частоту качания, например 190 кГц. Изменяя грубо и плавно коэффициент отклонения осциллографа по оси X, выбираем необходимый размах изображения по горизонтальной оси, пусть например 8 делений. Тогда одно деление по оси X будет соответствовать частоте 10 кГц (см. рис. 7).

Для проведения демонстрационного эксперимента собиралась установка по схеме рисунка 1. В качестве ГЛИН использован самодельный генератор, принципиальная схема которого приведена на рисунке 4, а в качестве ГУН (генератора управляемого напряжением) использован генератор MXG 9802-A. В установке использован осциллограф GOS-620.

Для исследования влияния внутреннего сопротивления генератора на резонансные свойства параллельного колебательного контура четырехполюсник собран по схеме рисунка 5. Резисторы R1 - R3 позволяют изменить внутреннее сопротивление генератора си-

нусоидального напряжения. Для исследования влияния сопротивления нагрузки на резонансные свойства параллельного колебательного контура четырехполюсник собран по схеме рисунка 6. Резистор R1 определяет внутреннее сопротивление генератора синусоидального напряжения, а резисторы R2 - R4 обеспечивают необходимую нагрузку.

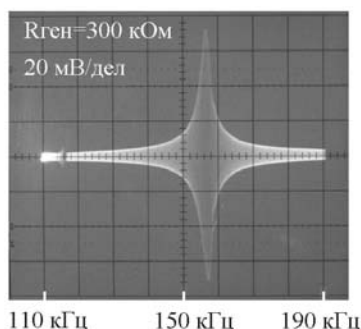


Рис. 7

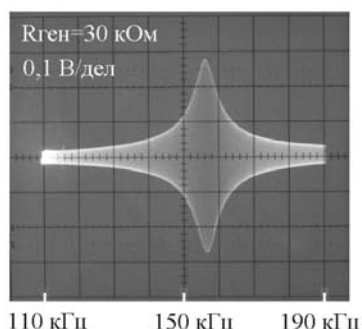


Рис. 8

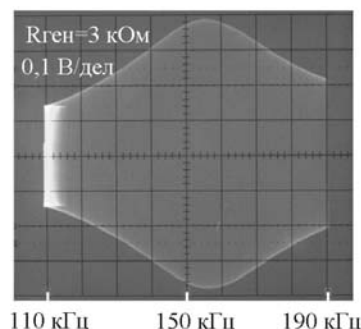


Рис. 9

На рис. 7 – 9 приведены графики зависимости выходного напряжения параллельного колебательного контура от частоты при различных внутренних сопротивлениях генератора. На каждой осциллограмме указаны сопротивления резисторов в соответствии с рисунком 5. Из осциллограмм рис. 7 – 9 видно, что полоса пропускания параллельного колебательного контура при уменьшении внутреннего сопротивления генератора расширяется, а напряжение на выходе контура увеличивается.

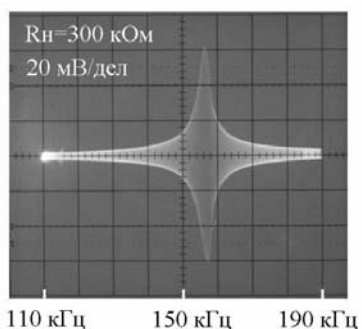


Рис. 10

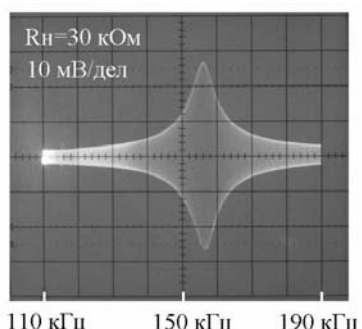


Рис. 11

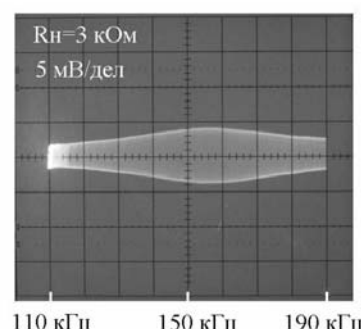


Рис. 12

На рис. 10 – 12 приведены графики зависимости выходного напряжения параллельного колебательного контура от частоты при различных сопротивлениях нагрузки. На каждой осциллограмме указаны сопротивления резисторов в соответствии с рисунком 6. Из осциллограмм рис. 10 – 12 видно, что при уменьшении сопротивления нагрузки полоса пропускания параллельного колебательного контура расширяется, а напряжение на выходе контура уменьшается.

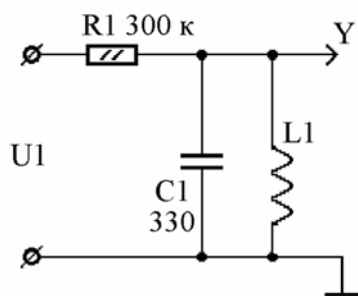
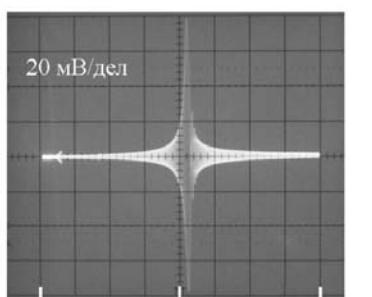


Рис. 13

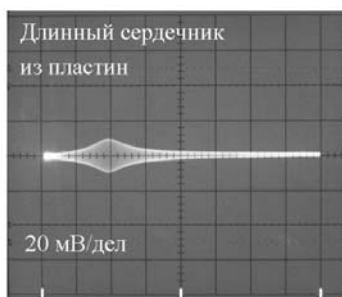
Для исследования влияния материала и формы сердечника катушки индуктивности на резонансные свойства параллельного колебательного контура четырехполюсник собран по схеме рисунка 13. Катушка индуктивности намотана на каркасе диаметром 63 мм и высотой 90 мм. Длина намотки катушки 80 мм. Результаты исследования влияния материала и формы сердечника катушки индуктивности на резонансные свойства параллельного колебательного контура приведены на рисунках 14-25. На каждом рисунке указаны коэффициент отклонения по оси Y и градуировка оси X по частоте. Для удобства обнаружения влияния материала и формы сердечника рисунки сгруппированы. Для каждой группы из 3 рисунков показана зависимость выходного напряжения параллельного колебательного контура от частоты при отсутствии сердечника в катушке индуктивности.

Сравнение рисунков 15 и 16 с рисунком 14 показывает, что при внесении внутрь катушки индуктивности ферромагнитного сердечника из пластин от универсального школьного разборного трансформатора резонансная частота уменьшается и расширяется полоса пропускания контура, а при внесении сплошного сердечника резонансная частота увеличивается и расширяется полоса пропускания.



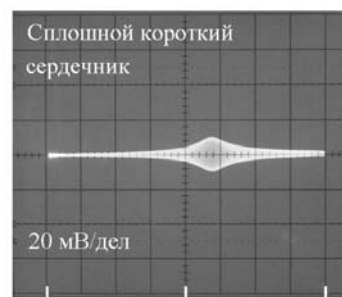
30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 14



30 кГц 150 кГц 270 кГц

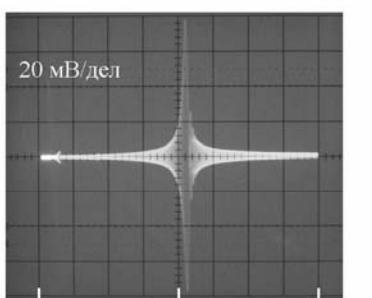
Рис. 15



30 кГц 150 кГц 270 кГц

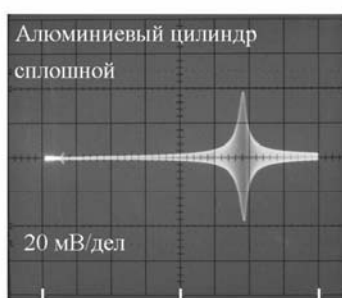
Рис. 16

На рисунках 17 – 19 приведены результаты эксперимента с двумя отрезками алюминиевых трубок от электролитического конденсатора. Внешний диаметр трубок 45 мм, высота 85 мм, а толщина стенки 0,9 мм. Сравнение рисунков 18 и 19 с рисунком 17 показывает, что при внесении внутрь катушки индуктивности сплошной алюминиевой трубки



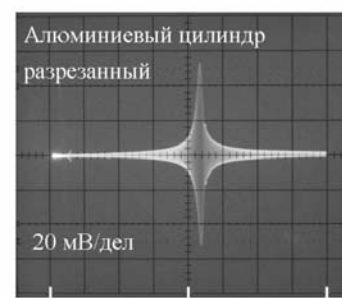
30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 17



30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 18

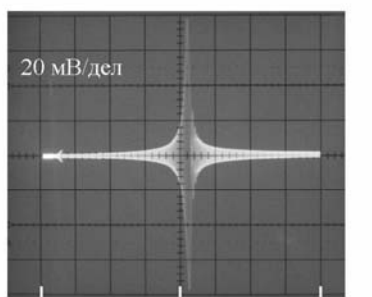


30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 19

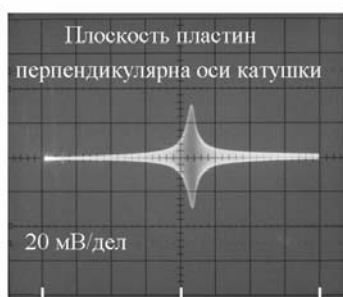
резонансная частота увеличивается значительно и расширяется полоса пропускания контура, а при внесении разрезанной вдоль образующей алюминиевой трубки резонансная частота увеличивается незначительно и незначительно расширяется полоса пропускания.

На рисунках 20 – 22 приведены результаты эксперимента с ферромагнитным кубиком из пластин. Кубик отрезан от сердечника от универсального разборного трансформатора



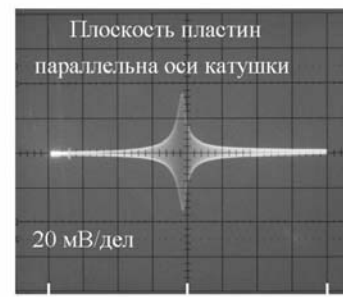
30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 20



30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 21



30 кГц 150 кГц 270 кГц

Рис. 22

и имеет размеры 35*35*35 мм. Сравнение рисунков 21 и 22 с рисунком 20 показывает, что если плоскость пластин кубика перпендикулярна оси катушки индуктивности, то резонансная частота увеличивается и расширяется полоса пропускания, а если плоскость пластин кубика параллельна оси катушки, то резонансная частота уменьшается и незначительно расширяется полоса пропускания контура.

На рисунках 23 – 25 приведены результаты эксперимента с двумя отрезками ферромагнитных трубок. Внешний диаметр трубок 52 мм, высота 85 мм, а толщина стенки 0,3 мм. Сравнение рисунков 24 и 25 с рисунком 23 показывает, что при внесении внутрь катушки индуктивности ферромагнитной сплошной трубки резонансная частота увеличивается и расширяется полоса пропускания контура, а при внесении ферромагнитной разрезанной вдоль образующей трубки резонансная частота уменьшается и расширяется полоса пропускания.

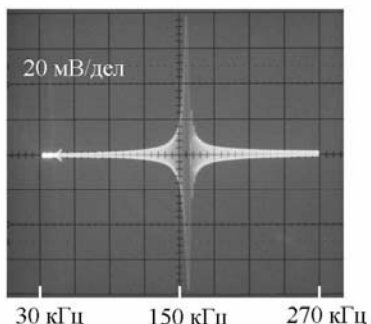


Рис. 23

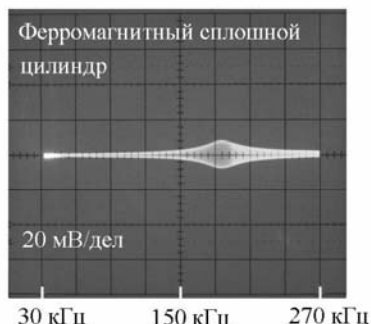


Рис. 24

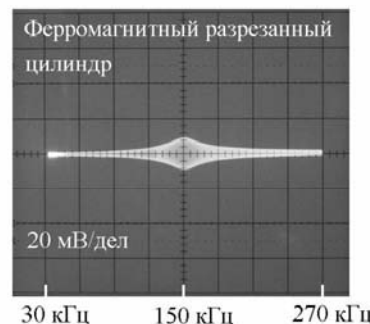


Рис. 25

На рисунке 26 приведена схема четырехполюсника для исследования режекторного фильтра. Контур L2, C2 индуктивно связан с контуром L1, C1. Параллельно конденсатору C2 подключен подстроечный конденсатор (на схеме не показан) для перестройки в не-

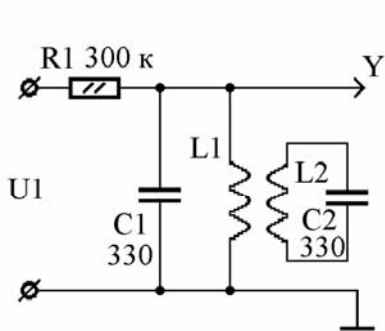


Рис. 26

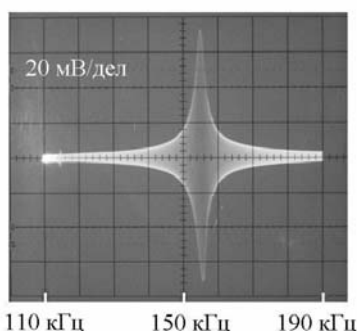


Рис. 27

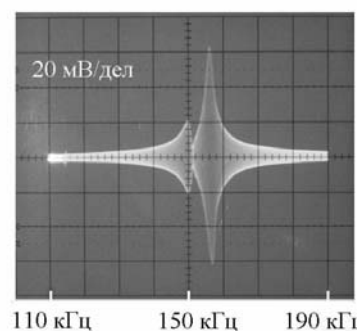


Рис. 28

больших пределах резонансной частоты контура L2, C2. Глубина провала в амплитудно-частотной характеристике режекторного фильтра зависит от расстояния между катушками L1 и L2.

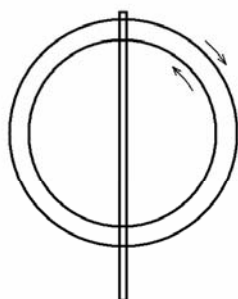


Рис. 29

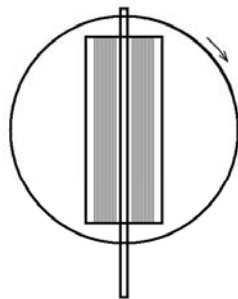


Рис. 30

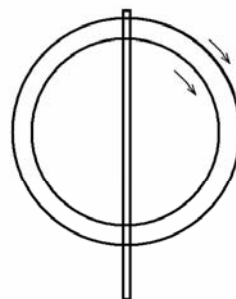


Рис. 31

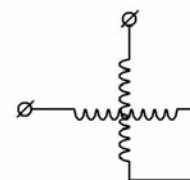


Рис. 32

Для перестройки резонансной частоты колебательного контура можно использовать вариометр. Катушки, у которых индуктивность может регулироваться в широких пределах, служат для плавной настройки контуров в диапазоне волн и называются вариометрами. Схематическое изображение вариометра с подвижной катушкой показано на рисунках 29, 30, 31. Вариометр состоит из двух катушек, обычно соединенных последовательно.

Наружная катушка неподвижна и называется статором, а внутренняя катушка может вращаться на оси и называется ротором. Индуктивность вариометра при вращении подвижной катушки изменяется вследствие изменения взаимной индуктивности между катушками. В положении, показанном на рисунке 29, токи в катушках протекают в противоположных направлениях и результирующая индуктивность катушки минимальна. В положении, показанном на рисунке 31, токи в катушках протекают в одном направлении и результирующая индуктивность катушки максимальна. При вращении подвижной катушки на 180° получается плавное изменение индуктивности от минимального до максимального значения.

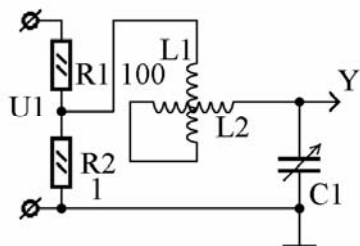


Рис. 33

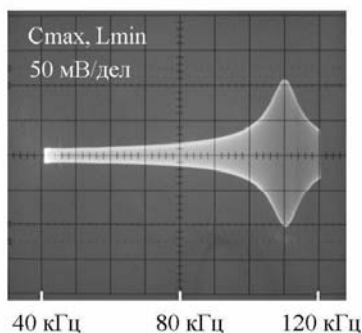


Рис. 34

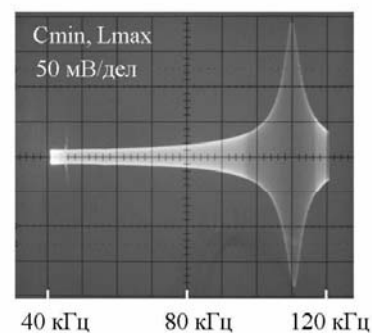


Рис. 35

На рисунке 33 приведена схема последовательного колебательного контура, перестройку резонансной частоты которого можно выполнять как с помощью конденсатора переменной емкости $C1$, так и с помощью вариометра $L1$. При исследовании АЧХ последовательного колебательного контура внутреннее сопротивление генератора синусоидальных колебаний должно быть как можно меньше. Для уменьшения внутреннего сопротивления генератора использован делитель напряжения на резисторах $R1$, $R2$. На рисунках 34 и 35 показаны зависимости выходного напряжения последовательного колебательного контура настроенного на одну и ту же резонансную частоту двумя способами: на рисунке 34 емкость конденсатора максимальна, а индуктивность катушки минимальна, а на рисунке 35 емкость конденсатора минимальна, а индуктивность катушки максимальна. Из сравнения рисунков 34 и 35 видно, что добротность контура максимальна при максимальной индуктивности катушки.

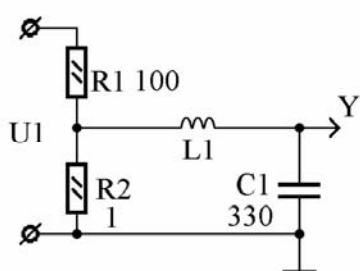


Рис. 36

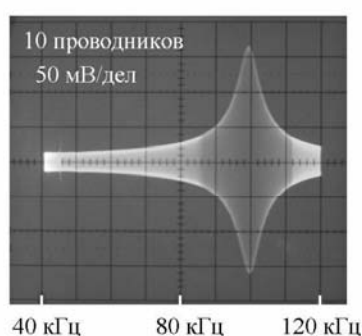


Рис. 37

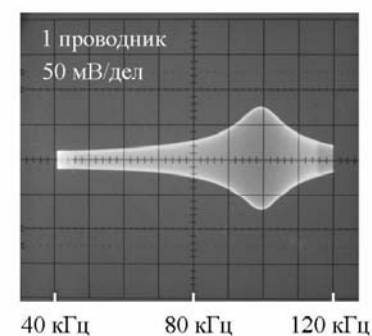


Рис. 38

Для исследования влияния провода литцендрат на резонансные свойства фильтра с последовательным колебательным контуром собирается экспериментальная установка по схеме рисунка 1, принципиальная схема четырехполюсника приведена на рисунке 36. На рисунке 36 показана схема контура для случая, когда выходное напряжение снимается с конденсатора. Катушка индуктивности намотана проводом литцендрат, имеющим 10 проводников, диаметр каждого из которых $0,1$ мм. Из сравнения рисунков 37 и 38 видно, что добротность колебательного контура больше, если используются все проводники провода литцендрат.

Последовательный колебательный контур можно использовать двумя способами. Выходное напряжение контура можно снимать либо с конденсатора, либо с катушки индуктивности. На рисунках 39, 40 приведены результаты моделирования фильтра с последовательным колебательным контуром в программе Electronics Workbench. Активное сопротивление катушки выбрано большим, чтобы продемонстрировать смещение максимума в амплитудно-частотной характеристике фильтра. В фильтрах с параллельным колеба-

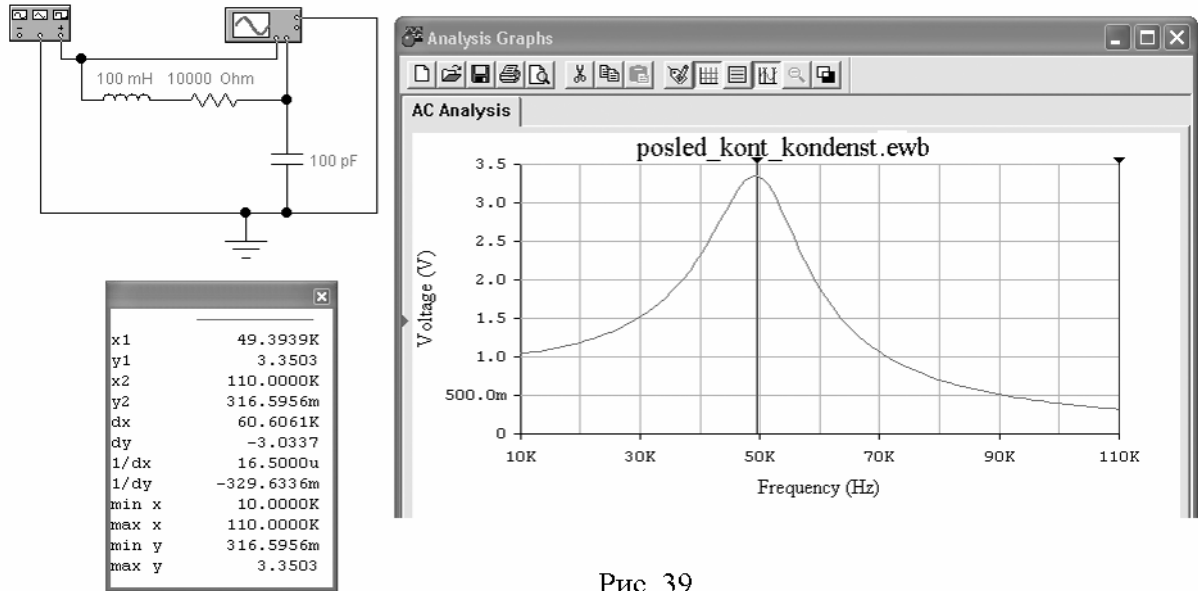


Рис. 39

тельным контуром увеличение активного сопротивления контура приводит к уменьшению резонансной частоты. В последовательном колебательном контуре смещение резонансной частоты зависит от способа подключения контура. На рисунке 39 показана АЧХ последовательного контура для случая, когда выходное напряжение снимается с конденсатора.

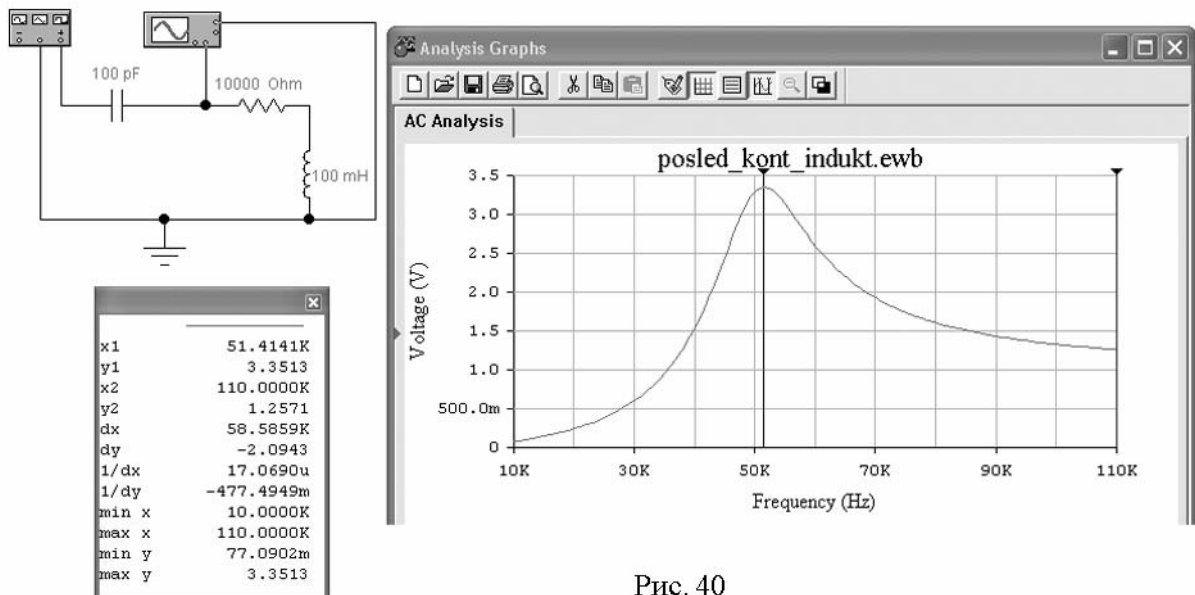


Рис. 40

В этом случае максимальное выходное напряжение получается на частоте 49,3939 кГц. Расчет показывает, что резонансная частота по току равна 50,3547 кГц.

На рисунке 40 показана АЧХ последовательного контура для случая, когда выходное напряжение снимается с катушки индуктивности. Максимальное выходное напряжение получается на частоте 51,4141 кГц, а резонансная частота по току равна 50,3547 кГц.

Таким образом, резонансная частота фильтра получается выше резонансной частоты по току, если выходное напряжение снимается с катушки индуктивности.

На рисунке 41 приведены результаты расчета в программе Serpik Graphs зависимостей от частоты напряжений и тока в последовательном колебательном контуре. На этом рисунке использованы следующие обозначения: U_C – зависимость выходного напряжения последовательного колебательного контура от частоты, снимаемого с конденсатора; U_L – зависимость выходного напряжения последовательного колебательного контура от частоты, снимаемого с катушки индуктивности; I_R – зависимость от частоты в последовательном колебательном контуре. Параметры контура выбраны такими, как и при моделировании в программе Electronics Workbench. Напряжение на выходе генератора установлено 1 В.

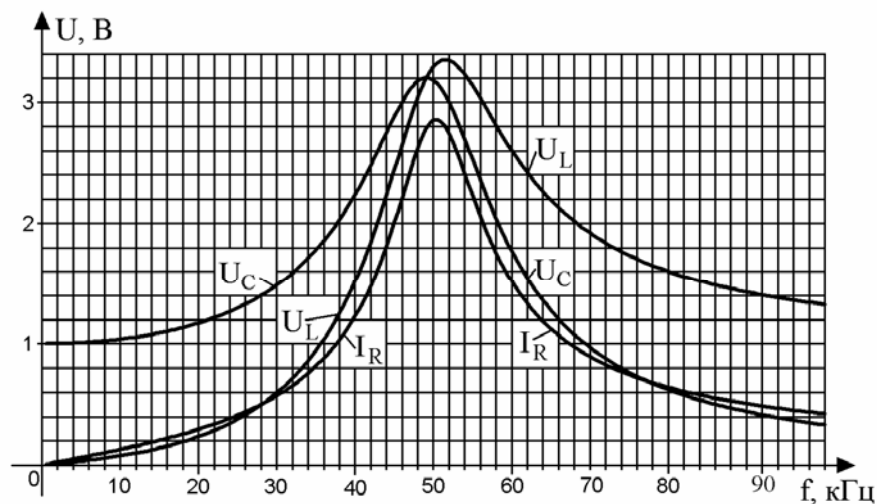


Рис. 41

Если выходное напряжение снимается с конденсатора, то выходное напряжение контура U_C при приближении частоты к нулю стремится к напряжению на зажимах источника. Если выходное напряжение снимается с катушки индуктивности, то выходное напряжение контура U_L при стремлении частоты к бесконечности стремится к напряжению на зажимах источника. Активное сопротивление контура выбрано значительным, чтобы смещение резонансных частот напряжений U_C , U_L было заметным.

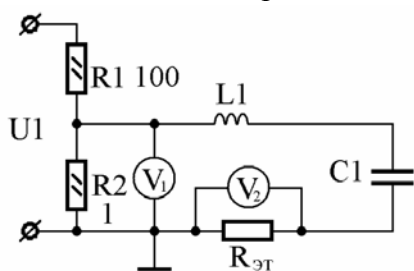


Рис. 42

Активное сопротивление последовательного колебательного контура определяется в основном активным сопротивлением катушки индуктивности. Для исследования зависимости активного сопротивления катушки индуктивности от частоты собирается экспериментальная установка по схеме рисунка 42. Для уменьшения выходного сопротивления генератора использован делитель напряжения на резисторах R1, R2. Исследовалась катушка индуктивности на 220 В от универсального школьного трансформатора.

Вольтметр V1 (В3-38А) измеряет напряжение на входе последовательного колебательного контура. Вольтметр V2 (В3-38А) измеряет напряжение на резисторе R_{эт}, что позволяет определить ток в последовательном контуре. Сопротивление контура определялось на резонансной частоте, которая изменялась конденсатором C1. Получились следующие значения сопротивления катушки индуктивности для разных частот:

f, кГц	18	26,5	42
R, Ом	29	56	193

Собственную емкость катушки индуктивности C_k определить достаточно просто, построив график зависимости квадрата периода собственных колебаний от емкости C подключаемого конденсатора $T^2 = 4\pi^2 L(C + C_k)$. Для построения графика достаточно определить 2 точки.

На рисунках 43, 44 показаны возможности моделирования затухающих колебаний в контуре с помощью программы Electronics Workbench. Для возбуждения колебаний в контуре используются прямоугольные импульсы напряжения с относительной длительностью импульсов 0,001, подаваемые в контур через полупроводниковый диод. Относительная длительность импульсов – это отношение длительности импульса к периоду следования импульсов.

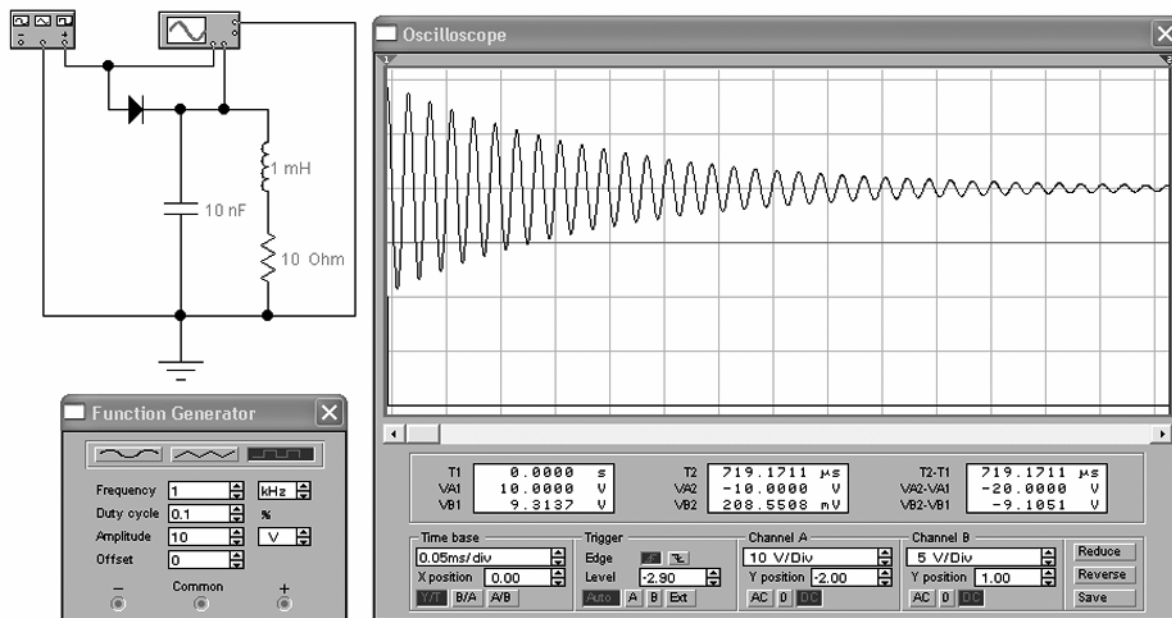


Рис. 43

Резонансные частоты и активные сопротивления контуров в обоих случаях одинаковы, однако, характер затухания колебаний в контурах разный. Для контура на рисунке 43 емкость конденсатора равна 10 нФ, а индуктивность катушки 1 мГн. Для контура на рисунке 44 емкость конденсатора равна 1 нФ, а индуктивность катушки 10 мГн.

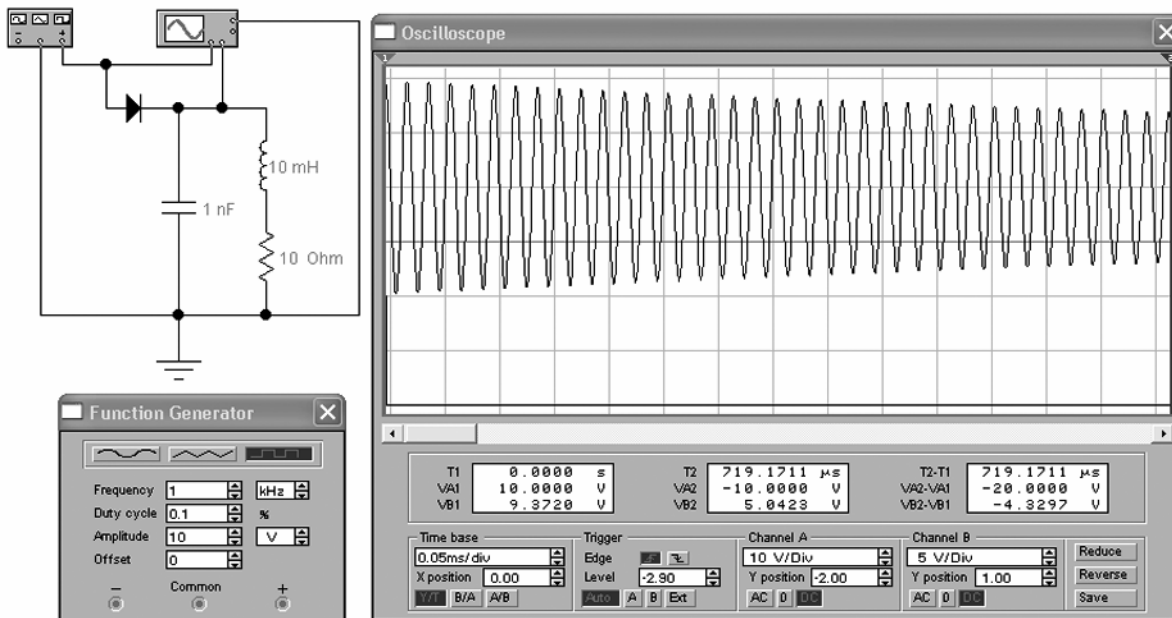


Рис. 44

Из сравнения рисунков 43 и 44 следует, что чем больше индуктивность катушки при одной и той же резонансной частоте контура, тем медленнее затухают колебания в контуре. При увеличении активного сопротивления контура колебания затухают быстрее.