

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ

Измерение импеданса и определение параметров электрических цепей методом синхронного детектирования

выполнили студенты 654а группы ФЭФМ

Агафонов Владислав
Карпова Татьяна

Содержание

1 Цели работы	2
2 Приборы, используемые в работе	2
3 Обзор методов измерения импеданса	3
3.1 Описания, преимущества и недостатки	3
3.2 Краткое сравнение	5
4 Экспериментальная установка	6
5 Исследование спектральных зависимостей импедансов (адмиттансов) многослойных керамических конденсаторов (MLCC)	7
5.1 Эквивалентная схема	7
5.2 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_1 = 150 \text{ pF}$	8
5.3 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_2 = 1,5 \text{ nF}$	9
5.4 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_3 = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$	10
6 Исследование спектральных зависимостей импеданса (адмиттанса) катушки индуктивности	11
6.1 Эквивалентная схема	11
6.2 Катушка индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$	12
7 Исследование спектральных зависимостей импеданса (адмиттанса) магазина индуктивностей	13
8 Контролируемое изменение ёмкости	14
9 Исследование спектральных характеристик последовательного контура	15
9.1 Эквивалентная схема	15
9.2 Последовательный контур $C = 150 \text{ pF}$, $L = 3,13 \text{ mH}$	16
10 Исследование спектральных характеристик параллельного контура	17
10.1 Эквивалентная схема	17
10.2 Параллельный контур $C = 150 \text{ pF}$, $L = 3,13 \text{ mH}$	18
11 Измерение спектральных характеристик колебательного контура с неполным включением ёмкости	19
11.1 Эквивалентная схема	19
11.2 Колебательный контур с неполным включением ёмкости ($C_a = 1,5 \text{ nF}$ и $C_b = 150 \text{ nF}$)	20
11.3 Колебательный контур с неполным включением ёмкости ($C_a = 150 \text{ pF}$ и $C_b = 1,5 \text{ nF}$)	21
12 Выводы	21

1 Цели работы

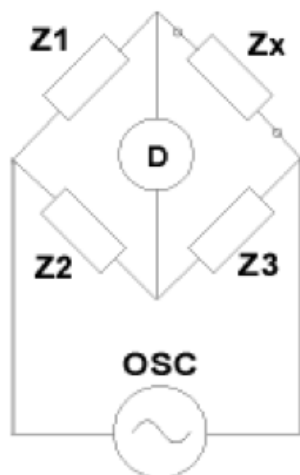
1. Получение базовых навыков исследования методом радиочастотной спектроскопии (РЧ-спектроскопии) с использованием синхронного детектора.
2. Построение эквивалентных схем, учитывающих паразитные эффекты, для двухполюсников.
3. Аппроксимация полученных с помощью РЧ-спектроскопии зависимостей и определение таких параметров двухполюсников, как сопротивление, емкость и индуктивность с помощью эквивалентных схем.
4. Сравнение значений параметров двухполюсников, полученных с помощью других методов измерения.

2 Приборы, используемые в работе

- Генератор сигналов DS345 (SRS)
- Синхронный детектор SR865 (SRS)
- Магазин сопротивлений RS-201W
- Магазин ёмкостей CS-301L
- Магазин индуктивностей LS-400L
- Катушка индуктивности номиналом $L = 3\text{ мГн}$
- Конденсаторы многослойные керамические (MLCC) номиналами 1,5 нФ, 150 пФ и 2,2 мкФ
- Конденсатор многослойный керамический (MLCC) номиналом 150 нФ в качестве дополнения
- Резистор плёночный номиналом 46,5 Ом
- Мультиметры UNI-T UT39C и UNI-T UT602

3 Обзор методов измерения импеданса

3.1 Описания, преимущества и недостатки



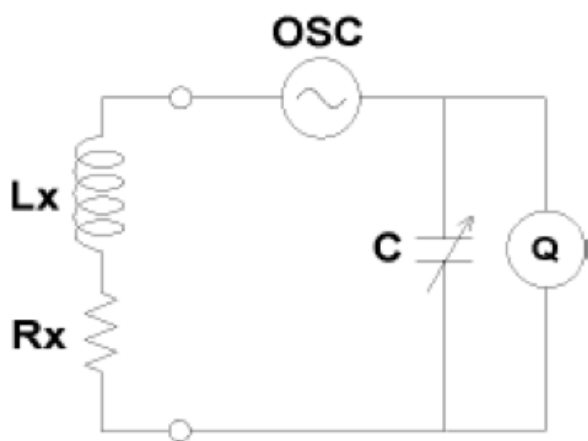
$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

Мостовая схема

Когда ток через детектор (D) не течет, значение неизвестного импеданса может быть получено через отношение других известных элементов моста. Различные типы мостов, с использованием L, C и R элементов в качестве компонентов моста, могут быть использованы для измерений различных неизвестных элементов.

Преимущества: Высокая точность (0,1 %). Покрытие широкого диапазона частот при разных мостах. Низкая стоимость.

Недостатки: Необходима ручная балансировка. Необходимость в изменении конфигурации для изменения измеряемой частоты.

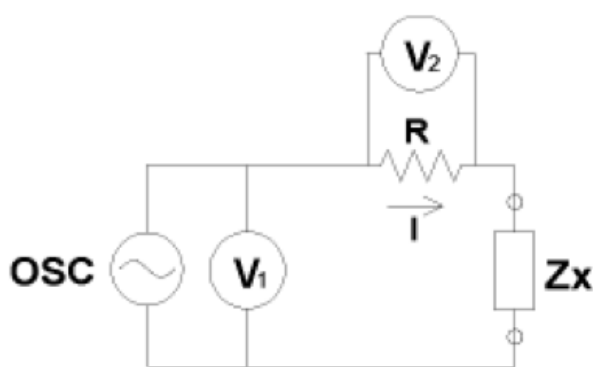


Резонансный метод

Когда цепь настроена на резонанс, регулируя переменный конденсатор C, неизвестный импеданс L_x и R_x может быть получен из значений частоты, емкости и добротности Q. Добротность измеряется непосредственно вольтметром, подсоединенным параллельно к конденсатору. Поскольку потери в цепи очень малы, могут быть измерены высокие значения Q (например, 1000). Помимо прямого (непосредственного) подключения, изображенного здесь, последовательное и параллельное подключения возможны для широкого диапазона измерения импеданса.

Преимущества: Хорошая точность при измерении добротности вплоть до высоких значений.

Недостатки: Необходима подстройка под резонанс. Точность измерения импеданса ограничена шириной спектральной линии.



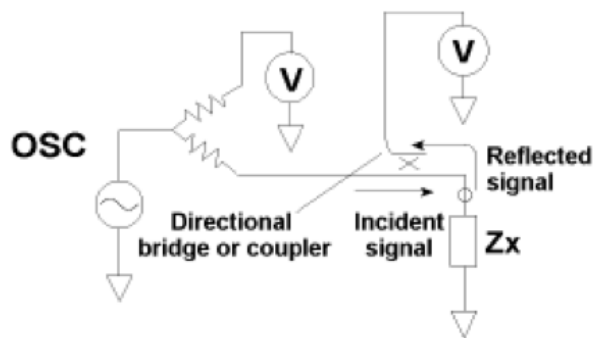
$$Z_x = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R$$

I-V метод

Неизвестный импеданс Z_x можно вычислить из измеренных значений напряжения и тока. Ток рассчитывается по измерению напряжения на резисторе R с низким значением сопротивления. На практике вместо R используется трансформатор с малыми потерями, чтобы избежать возникновения эффектов, связанных с использованием в цепи резистора с малым сопротивлением. Однако трансформатор ограничивает нижний предел диапазона частот.

Преимущества: Возможность измерять параметры заземленного элемента.

Недостатки: Рабочий диапазон частот ограничен трансформатором.

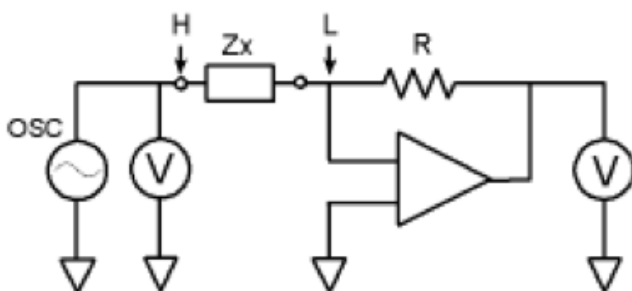
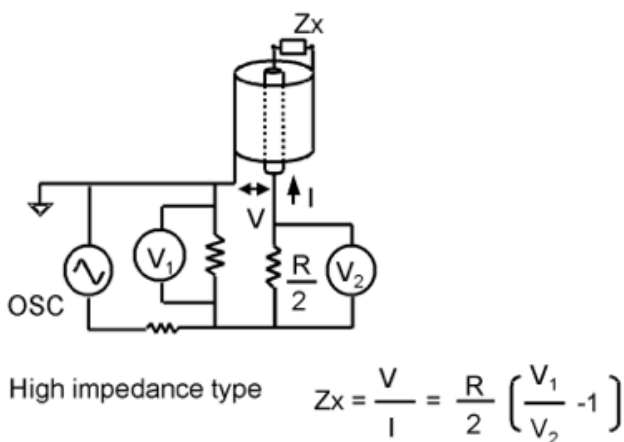
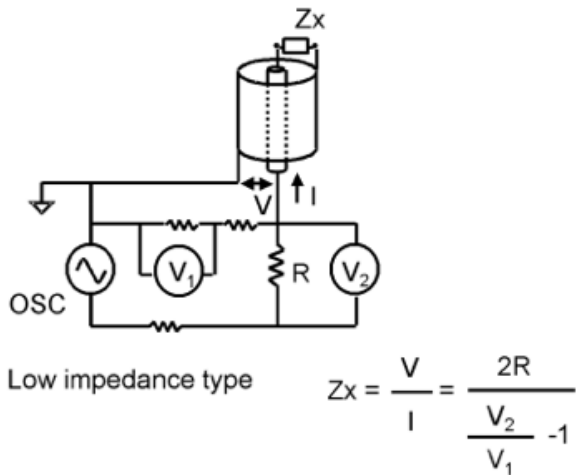


Network analysis method

Коэффициент отражения получается путем измерения отношения падающего сигнала к отраженному сигналу. Направляющий ответвитель или мост используется для обнаружения отраженного сигнала. Анализатор сети используется для подачи и измерения сигналов. Поскольку в этом методе измеряют отражение в тестируемом устройстве, он может быть использован в более широком частотном диапазоне.

Преимущества: Широкий диапазон частот.

Недостатки: Требуется калибровка, когда меняется частота измерений. Необходимость в перестройке конфигурации для измерений на другой частоте.



RF I-V метод

Хотя радиочастотный I-V метод измерения основан на том же принципе, что и I-V метод, он настроен иначе, используя схему измерения импеданса (с сопротивлением 50 Ом) и точным коаксиальным портом для измерений на высоких частотах. Существует два типа измерений по току и напряжению, подходящие для измерений малых или больших значений импеданса. Импеданс тестируемого прибора вычисляют при помощи измеренных значений тока и напряжений. Ток, текущий через тестируемый прибор, вычисляется из напряжения на известном малом сопротивлении (R). На практике вместо сопротивления обычно используется трансформатор с малыми потерями. Однако трансформатор ограничивает нижнюю границу диапазона частот.

Преимущества: Высокая точность (1 %) и возможность измерения импеданса на высоких частотах.

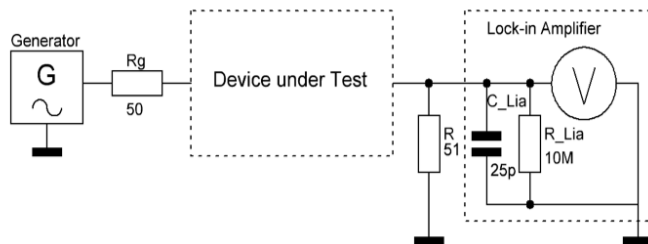
Недостатки: Рабочий диапазон частот ограничен трансформатором.

Автосбалансированный мост

Ток, протекающий через DUT (device under test), представленный на схеме в виде Z_x , также протекает через резистор R . Потенциал в точке L поддерживается на нулевом значении (т. н. «Виртуальная земля»), так как ток, текущий через R , уравнивается с током через устройство с помощью усилителя и преобразователя. Импеданс DUT вычисляется, используя измерение напряжения в точке H и на резисторе R . На практике, схема авто-сбалансированного моста меняется в зависимости от измеряемого спектрального диапазона (вплоть до 110 MHz).

Преимущества: Покрытие широкого диапазона частот. Высокая точность в широком диапазоне измерений импеданса. Возможность измерения импеданса заземленных приборов.

Недостатки: Измерения в высоком частотном диапазоне не доступны.



Синхронный детектор

В синхронном детекторе для выделения полезного сигнала переменного тока используется метод фазочувствительного синхронного детектирования на частоте опорного сигнала. Исследуемый объект возбуждается сигналом фиксированной частоты, а его реакция анализируется синхронным услителем с использованием опорного сигнала той же самой частоты. В основе метода лежит перемножение этих сигналов. В результате перемножения получим сигналы на разностной и суммарной частотах. При равенстве частот получается сигнал на удвоенной частоте, который можно отфильтровать, используя фильтр низких частот. Для раздельного определения амплитуды входного сигнала используют второй опорный сигнал сдвинутый по фазе на $\frac{\pi}{2}$ относительно первого.

Преимущества: Высокая частотная избирательность, позволяет измерять как амплитуду, так и фазу сильно зашумленного сигнала. Отношение сигнал/шум, при детектировании меньше 10^{-6} .

Недостатки: Ограниченная скорость сканирования.

3.2 Краткое сравнение

Метод	Диапазон частот	Применение
Мостовой	до 300 MHz	Лаборатория
Резонансный	10 kHz–70 MHz	Высокий Q
I–V	10 kHz–100 MHz	Заземлённые DUT
Network analysis	≥ 300 kHz	РЧ компоненты
RF I–V	1MHz–3GHz	РЧ компоненты
Автобалансированный мост	20 Hz– 110 MHz	РЧ компоненты
Синхронный детектор	1mHz – 600 MHz	РЧ компоненты

4 Экспериментальная установка

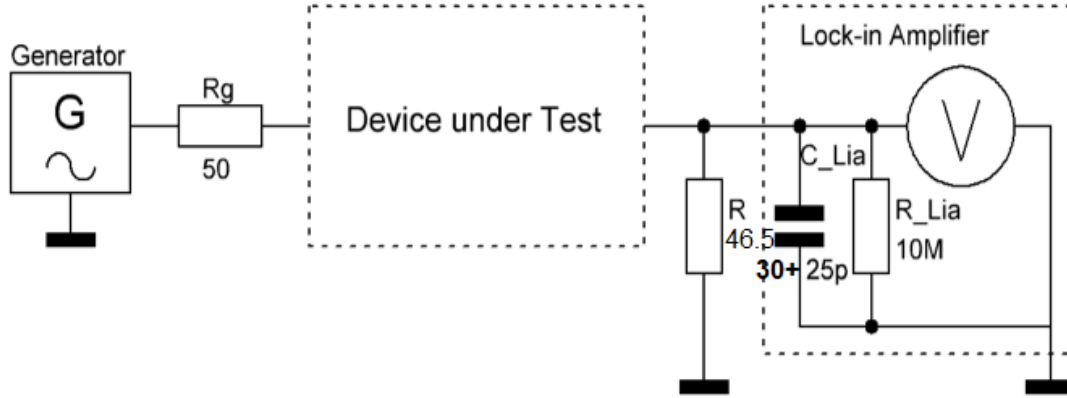


Рис. 1: Блок-схема установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для исследования спектральных зависимостей импедансов в лабораторной работе используется метод синхронного детектирования. Измерения в лабораторной работе автоматизированы: при помощи компьютера работа синхронного детектора и генератора сигналов синхронизирована.

Значение напряжения, регистрируемое синхронным детектором:

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|} \quad (1)$$

Значение импеданса, регистрируемое синхронным детектором:

$$Z = Z_{DUT} + R_g + R; \quad (2)$$

Используемые обозначения:

- U_g – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора;
- R – значение сопротивления резистора, используемого для измерения напряжения (сопротивление нагрузки, $R = 46.5 \Omega$)
- C_{in} – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей ($C_{in} = 30 + 25$ пФ)
- Z_{DUT} – импеданс исследуемого элемента (Device under test)
- R_g – внутреннее сопротивление генератора ($R_g = 50 \Omega$)

5 Исследование спектральных зависимостей импедансов (адмиттансов) многослойных керамических конденсаторов (MLCC)

5.1 Эквивалентная схема

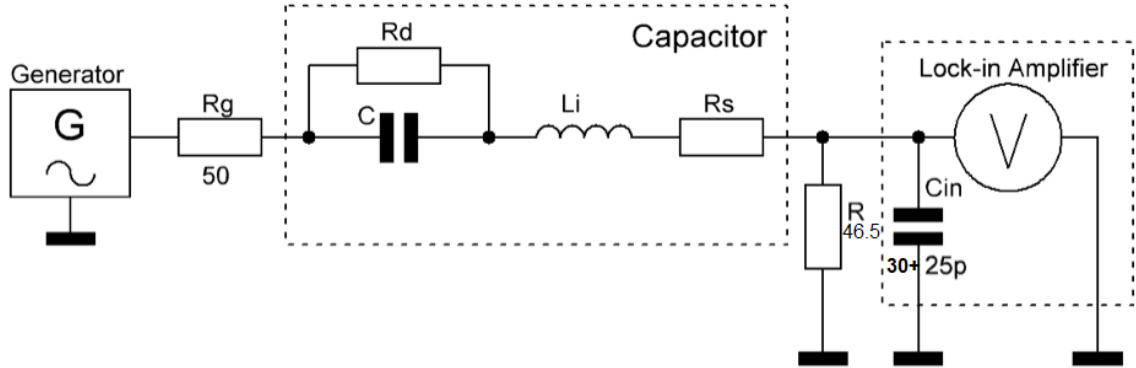


Рис. 2: Эквивалентная схема установки для измерения электрических параметров конденсатора

На рисунке 2 изображена эквивалентная схема установки для измерения электрических параметров конденсатора. Полный импеданс цепи и напряжение на входе синхронного детектора будут равны:

$$Z = \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + R_g + R_s + i\omega L_i + \frac{R_d \frac{1}{i\omega C}}{R_d + \frac{1}{i\omega C}} \quad (3)$$

$$Z = \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + R_g + Z_C \quad (4)$$

$$|Z| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \quad \omega = 2\pi f \quad (5)$$

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|}, \quad (6)$$

где U_{in} – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на входе синхронного детектора; $C_{in} = 30 + 25 \text{ pF}$ – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей; $U_g = 1 \text{ V}_{rms}$ – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора; $R_g = 50 \text{ }\Omega$ – внутреннее сопротивление генератора; R_d – сопротивление диэлектрика конденсатора; R_s – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора; L_i – эквивалентная последовательная индуктивность; C – ёмкость конденсатора; $R = 46,5 \text{ }\Omega$ – сопротивление нагрузочного резистора, на котором измеряется напряжение; Z – импеданс всей схемы; Z_C – импеданс эквивалентной схемы конденсатора; f – частота генератора.

Обработка всех результатов проводится в системе компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

5.2 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_1 = 150 \text{ pF}$

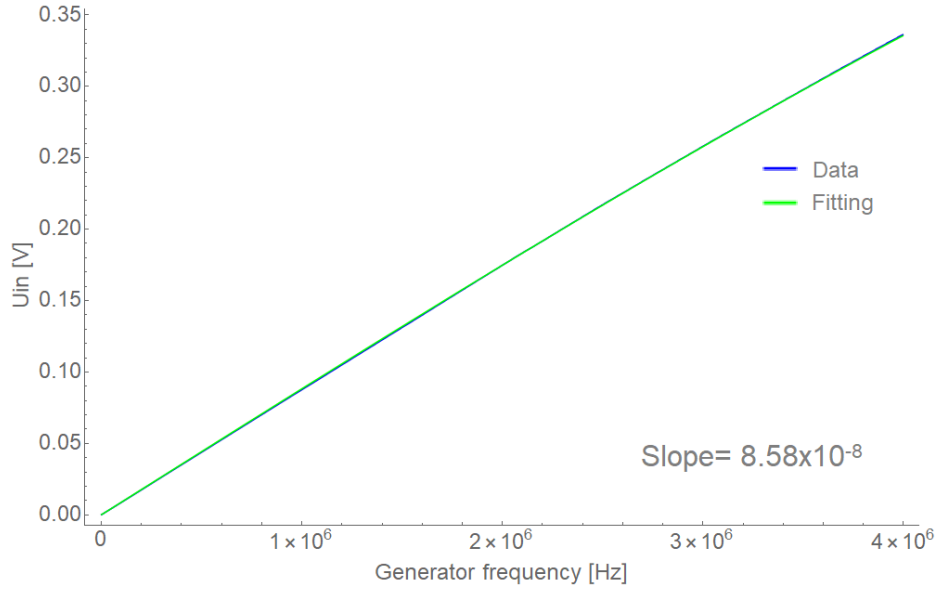


Рис. 3: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с конденсатором $C_1 = 150 \text{ pF}$

Эксперимент был поставлен в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 2. Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённым в неё конденсатором $C_1 = 150 \text{ pF}$, график зависимости приведён на рисунке 3. Произведена аппроксимация экспериментальных данных согласно формулам (3) - (6) и получены следующие значения для элементов в эквивалентной схеме конденсатора:

$C_1, \text{ pF}$	152 ± 5
$L_{i1}, \text{ nH}$	983 ± 200
$R_{d1}, \text{ M}\Omega$	$0,5 \pm 0.3$
R_{s1}, Ω	$43,2 \pm 40$

Оказалось, что паразитная индуктивность пренебрежимо мала и может зависеть от различных внешних факторов, поэтому на практике допустимо пренебрегать наличием индуктивности у данного типа конденсаторов. Полученная в аппроксимации ёмкость равна $C_1 = (152) \text{ pF}$.

Проверка мультиметром показала, что ёмкость исследуемого конденсатора $C_1 = (150 \pm 1) \text{ pF}$.

5.3 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_2 = 1,5 \text{ nF}$

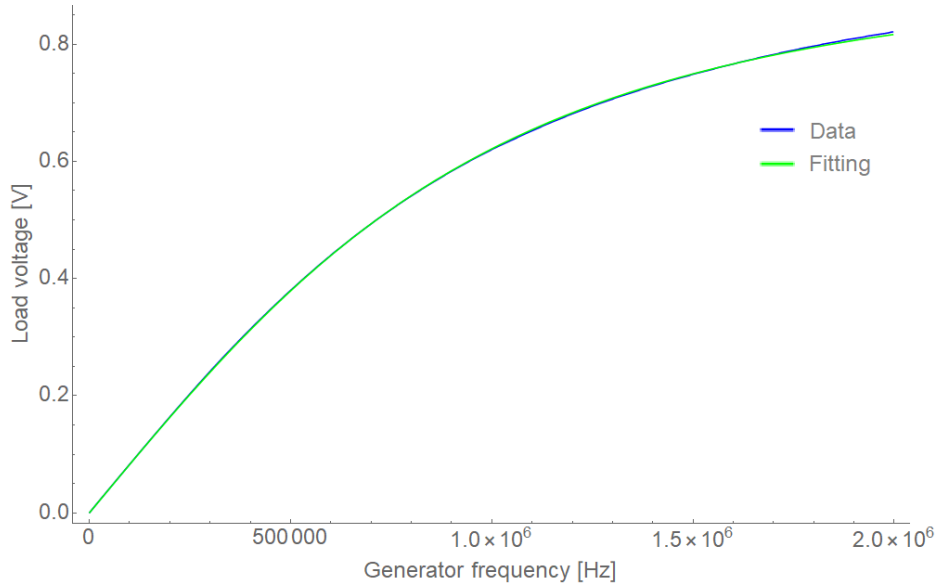


Рис. 4: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с конденсатором $C_2 = 1,5 \text{ nF}$

Эксперимент был поставлен в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 2. Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённым в неё конденсатором $C_2 = 1,5 \text{ nF}$, график зависимости приведён на рисунке 4. Произведена аппроксимация экспериментальных данных согласно (3) - (6) и получены следующие значения для элементов в эквивалентной схеме конденсатора:

$C_2, \text{ nF}$	$1,42 \pm 0,7$
$L_{i2}, \text{ nH}$	539 ± 200
$R_{d2}, \text{ M}\Omega$	$32,8 \pm 10$
R_{s2}, Ω	$5,8 \pm 3$

Проверка мультиметром показала, что ёмкость исследуемого конденсатора $C_2 = (1,44 \pm 0,01) \text{ nF}$

5.4 Конденсатор многослойный керамический (MLCC) $C_3 = 2,2 \mu F$

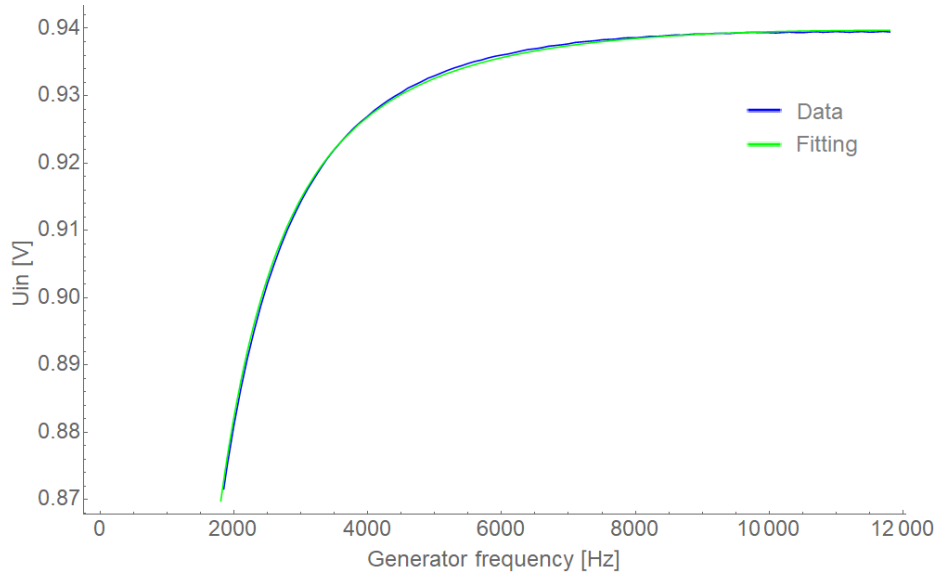


Рис. 5: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с конденсатором $C_3 = 2,2 \mu F$

Эксперимент был поставлен в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 2. Была получена. Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённым в неё конденсатором $C_3 = 2,2 \mu F$, график зависимости приведён на рисунке 4. Произведена аппроксимация экспериментальных данных согласно (3) - (6) и получены следующие значения для элементов в эквивалентной схеме конденсатора:

$C_3, \mu F$	$2,13 \pm 0,5$
$L_{i3}, \mu H$	86 ± 20
$R_{d3}, G\Omega$	$68,3 \pm 30$
R_{s3}, Ω	$2,5 \pm 1$

Проверка мультиметром показала, что ёмкость исследуемого конденсатора $C_3 = (2,06 \pm 0,01) \mu F$

6 Исследование спектральных зависимостей импеданса (адмиттанса) катушки индуктивности

6.1 Эквивалентная схема

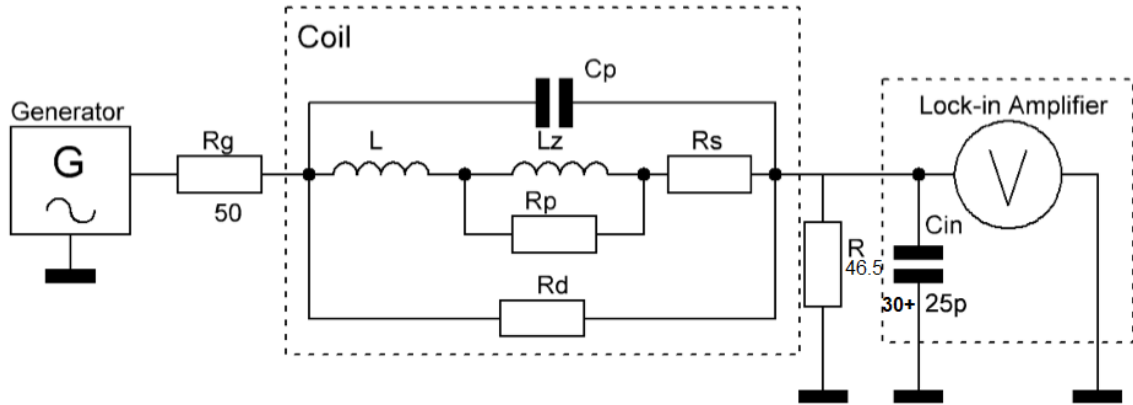


Рис. 6: Эквивалентная схема установки для измерения электрических параметров катушки индуктивности

На рисунке 6 изображена эквивалентная схема установки для измерения электрических параметров катушки индуктивности. Полный импеданс цепи и напряжение на входе синхронного детектора будут равны:

$$Z = R_g + \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + \frac{\frac{1}{i\omega C_p} \cdot (i\omega L + \frac{i\omega L_z R_p}{i\omega L_z + R_p} + R_s) \cdot R_d}{\frac{1}{i\omega C_p} \cdot (i\omega L + \frac{i\omega L_z R_p}{i\omega L_z + R_p} + R_s) + \frac{1}{i\omega C_p} \cdot R_d + (i\omega L + \frac{i\omega L_z R_p}{i\omega L_z + R_p} + R_s) \cdot R_d} \quad (7)$$

$$Z = R_g + \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + Z_L \quad (8)$$

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|}, \quad (9)$$

где U_{in} – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на входе синхронного детектора; $C_{in} = 30 + 25 \text{ pF}$ – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей; $U_g = 1 \text{ V}_{rms}$ – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора; $R_g = 50 \text{ } \Omega$ – внутреннее сопротивление генератора; R_d – сопротивление, характеризующее потери в собственной ёмкости; R_s – сопротивление, характеризующее потери в проводе катушки; R_p – сопротивление, характеризующее потери в катушке при повышении частоты; $L + L_z$ – собственная индуктивность; C_p – межвитковая ёмкость катушки; $R = 46,5 \text{ } \Omega$ – сопротивление нагрузочного резистора, на котором измеряется напряжение; Z – импеданс всей схемы; Z_L – импеданс эквивалентной схемы катушки индуктивности; f – частота генератора.

6.2 Катушка индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$

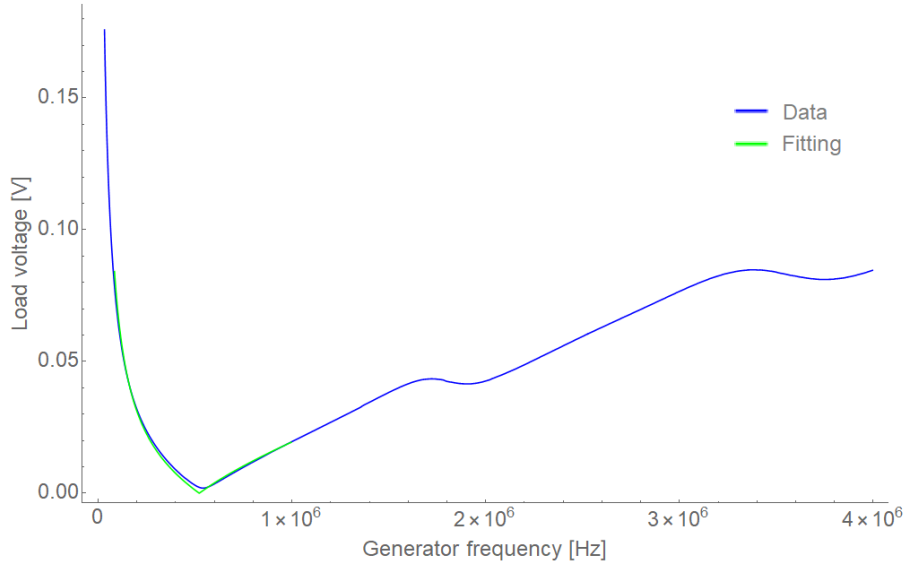


Рис. 7: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с катушкой индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$

Эксперимент был поставлен в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 6. Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённой в неё катушкой индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$, график зависимости приведён на рисунке 7. Произведена аппроксимация экспериментальных данных согласно (7) - (9) и получены следующие значения для элементов в эквивалентной схеме катушки индуктивности:

$L + L_z, \text{ mH}$	$3,05 \pm 0,3$	
$L_z, \text{ mH}$	1,1	фиксированное значение при аппроксимации
$R_d, \text{ k}\Omega$	50	фиксированное значение при аппроксимации
R_s, Ω	0,5	фиксированное значение при аппроксимации
$L, \text{ mH}$	$1,95 \pm 0,3$	аппроксимация
$C_p, \text{ pF}$	$45,3 \pm 5$	аппроксимация
R_s, Ω	1 ± 1	аппроксимация
R_p, Ω	236 ± 100	аппроксимация

Проверка мультиметром показала, что сопротивление, характеризующее потери в проводе катушки R_s и её индуктивность $L + L_z$ равны соответственно

$$R_s = (0,61 \pm 0,1)\Omega$$

$$L + L_z = (3,13 \pm 0,01) \text{ mH}$$

7 Исследование спектральных зависимостей импеданса (адмиттанса) магазина индуктивностей

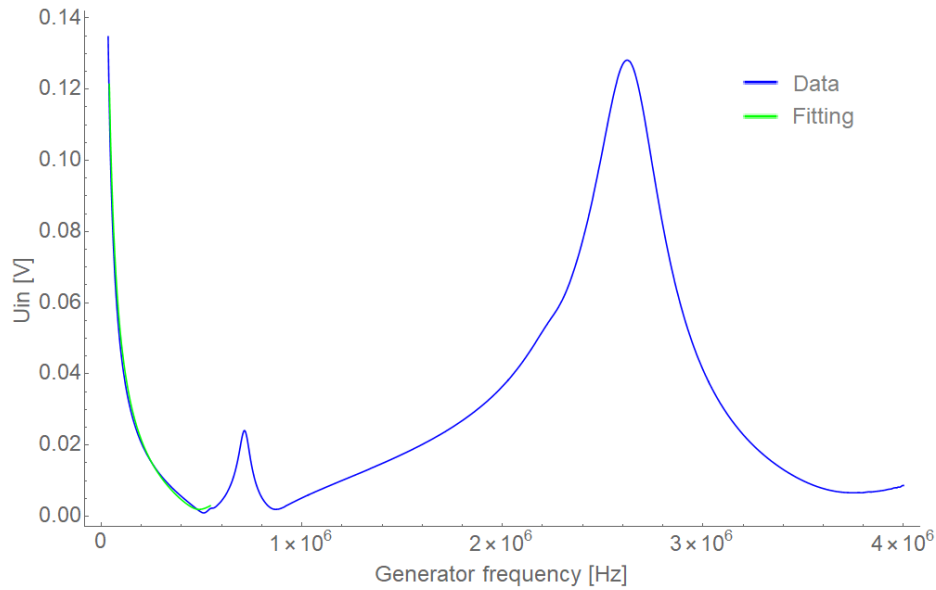


Рис. 8: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с магазином индуктивностей

Эксперимент был поставлен по схеме 6 на странице 11 (аналогично эксперименту с катушкой). Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённым в неё магазином индуктивностей со значением $L_{st} = 3,13 \text{ mH}$, график зависимости приведён на рисунке 8. Произведена аппроксимация экспериментальных данных согласно (7) - (9) и получены следующие значения для элементов в эквивалентной схеме катушки индуктивности:

$L + L_z, \text{ mH}$	$3,16 \pm 0,3$	
$L_z, \text{ mH}$	1,1	фиксированное значение при аппроксимации
$R_d, \text{ k}\Omega$	50	фиксированное значение при аппроксимации
R_s, Ω	0,5	фиксированное значение при аппроксимации
$L, \text{ mH}$	$1,95 \pm 0,3$	аппроксимация
$C_p, \text{ pF}$	$34,5 \pm 5$	аппроксимация
R_s, Ω	2 ± 1	аппроксимация
R_p, Ω	67 ± 100	аппроксимация

Проверка мультиметром показала, что сопротивление, характеризующее потери в проводе катушки R_s и её индуктивность $L + L_z$ равны соответственно

$$R_s = (2,1 \pm 0,1) \Omega$$

$$L = (3,13 \pm 0,01) \text{ mH}$$

8 Контролируемое изменение ёмкости



Рис. 9: Схема подключения конденсаторов для контролируемого изменения ёмкости контура

Была поставлена задача контролируемого изменения ёмкости на заранее заданное малое значение $C_1 \rightarrow C_2 = C_1 - \Delta C$. Эксперимент был поставлен по схеме 2 на странице 7 (аналогично эксперименту с конденсатором). Была получена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с включённым в неё конденсатором $C_1 = 150 \text{ pF}$, которая приведена на рисунке 13. Далее изменили ёмкость контура в соответствии со схемой 9 и снова сняли АЧХ цепи. Произвели аппроксимацию экспериментальных данных согласно (3) - (6) и получили экспериментальные значения ёмкостей C_1 и C_2 . Теоретическая оценка модифицированной ёмкости дает $C_2 = 149,85 \text{ pF}$. Далее провели проверку с использованием магазина ёмкостей (рисунки 10, 11 и 12). Проверка проводилась с учетом остаточной ёмкости магазина, т.е. при нуле показаний магазина истинная ёмкость была равна $C_{s0} = 36,3 \text{ pF}$ (получена из аппроксимации 10).

C_{s0}, pF	36,3
C_{s1}, pF	150,7
C_{s2}, pF	151,6
$C_1^{real} = 148,5$	
$C_2^{real} = 160,1$	

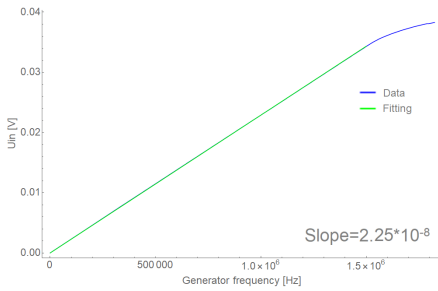


Рис. 10: Зависимость амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с магазином ёмкостей $C_{s0} = 0 \text{ pF}$

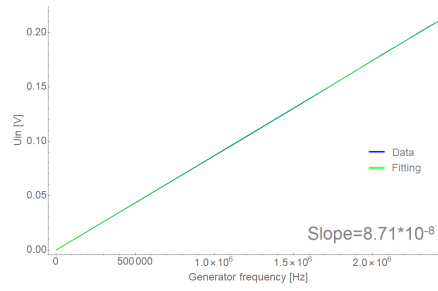


Рис. 11: Зависимость амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с магазином ёмкостей $C_{s1} = 113 \text{ pF}$

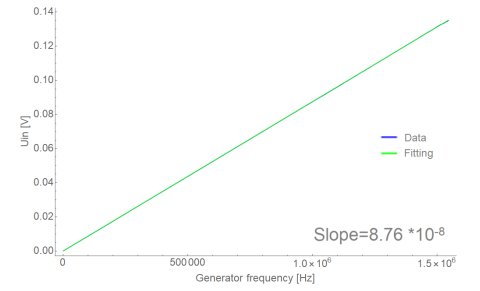


Рис. 12: Зависимость амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с магазином ёмкостей $C_{s2} = 114 \text{ pF}$

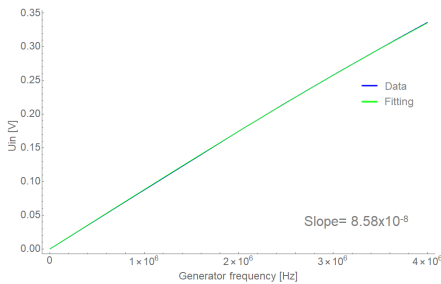


Рис. 13: Зависимость амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи до изменения ёмкости, $C_1 = 150 \text{ pF}$

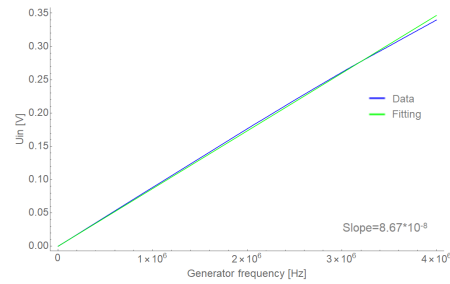


Рис. 14: Зависимость амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи после изменения ёмкости, $C_2 = 149,8 \text{ pF}$

9 Исследование спектральных характеристик последовательного контура

9.1 Эквивалентная схема

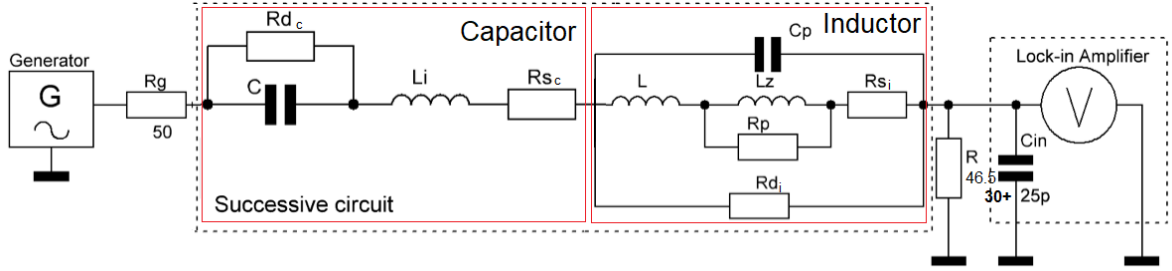


Рис. 15: Эквивалентная схема установки для измерения частотных характеристик последовательного контура

На рисунке 15 изображена эквивалентная схема установки для измерения характеристик колебательного контура с последовательным включением катушки индуктивности и конденсатора. Полный импеданс цепи и напряжение на входе синхронного детектора будут равны:

$$Z = R_g + \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + Z_C + Z_L \quad (10)$$

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|}, \quad (11)$$

где U_{in} – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на входе синхронного детектора; $C_{in} = 30 + 25 \text{ pF}$ – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей; $U_g = 1 \text{ V}_{rms}$ – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора; $R_g = 50 \text{ } \Omega$ – внутреннее сопротивление генератора; $R = 46,5 \text{ } \Omega$ – сопротивление нагрузочного резистора, на котором измеряется напряжение; Z – импеданс всей схемы; Z_C – импеданс эквивалентной схемы конденсатора (см. формулы (3)-(4)); Z_L – импеданс эквивалентной схемы катушки индуктивности (см. формулы (7)-(8)); f – частота генератора.

9.2 Последовательный контур $C = 150 \text{ pF}$, $L = 3,13 \text{ mH}$

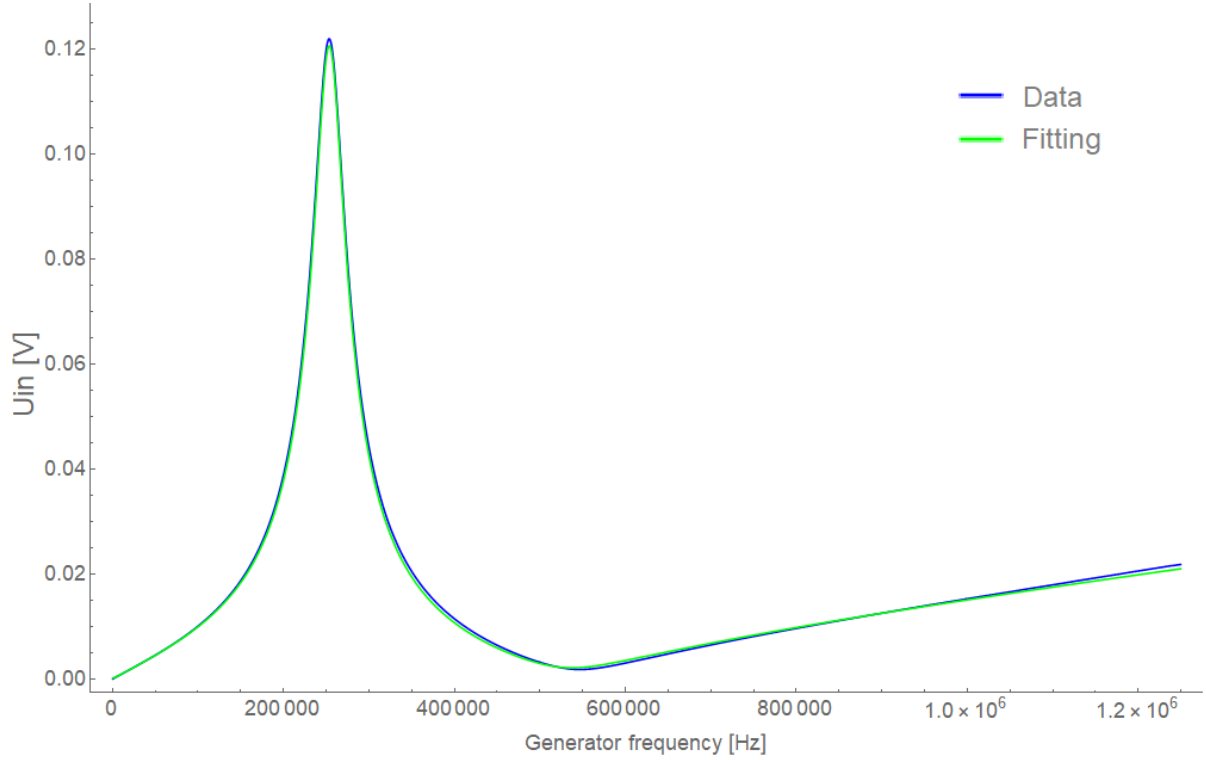


Рис. 16: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с последовательным включением конденсатора $C = 150 \text{ pF}$ и катушки индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$

Для схемы на рисунке 15 была измерена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с последовательным включением конденсатора и катушки индуктивности (график зависимости приведен на рисунке 16). Некоторые параметры контура при аппроксимации были зафиксированы значениями из прошлых измерений.

$L + L_z, \text{ mH}$	$3,16 \pm 0,3$	
$L, \text{ mH}$	$2,03 \pm 0,3$	аппроксимация
$C_p, \text{ pF}$	$4,5 \pm 0,7$	аппроксимация
$C_0, \text{ pF}$	150 ± 5	аппроксимация
$L_z, \text{ mH}$	1,1	фиксированное значение при аппроксимации
$R_{di}, \text{ k}\Omega$	50	фиксированное значение при аппроксимации
R_{si}, Ω	0,5	фиксированное значение при аппроксимации
R_{sc}, Ω	3	фиксированное значение при аппроксимации
$R_{dc}, \text{ M}\Omega$	0.5	фиксированное значение при аппроксимации
$L_c, \mu\text{H}$	1	фиксированное значение при аппроксимации
R_p, Ω	145	лучшее совпадение высоты пика при аппроксимации
R_s, Ω	0,5	лучшее совпадение высоты пика при аппроксимации

По этим данным получим значения резонансных частот контура:

$$F_1^{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_z)C_2}} = 211732 \pm 1000 \text{ Hz} \quad F_1^{ex} = 253707 \text{ Hz} \quad (12)$$

$$F_2^{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_z)C_{p1}}} = 536234 \pm 3000 \text{ Hz} \quad F_2^{ex} = 537791 \text{ Hz} \quad (13)$$

10 Исследование спектральных характеристик параллельного контура

10.1 Эквивалентная схема

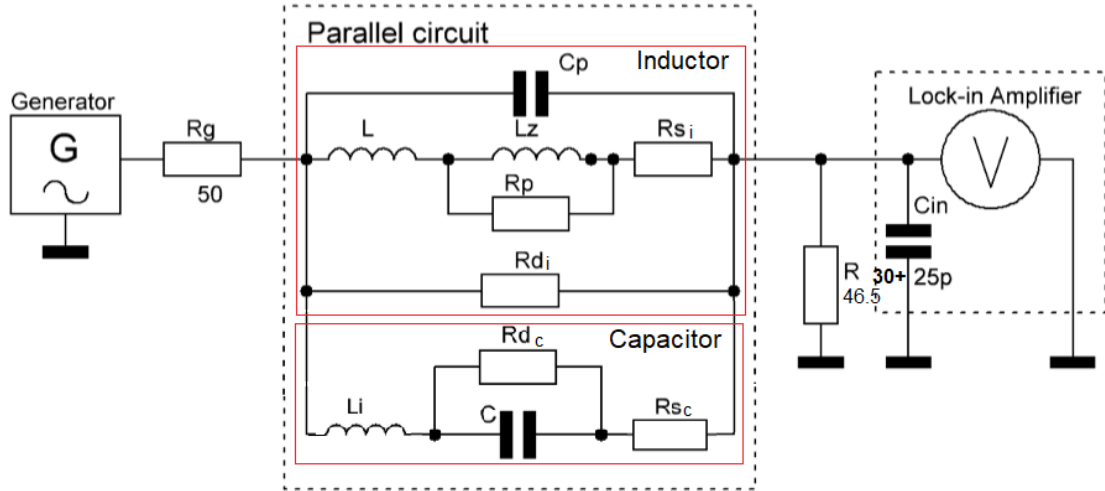


Рис. 17: Эквивалентная схема установки для исследования частотных характеристик параллельного контура

На рисунке 17 изображена эквивалентная схема установки для измерения характеристик контура с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности. Полный импеданс цепи и напряжение на входе синхронного детектора будут равны:

$$Z = R_g + \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + \frac{Z_C \cdot Z_L}{Z_C + Z_L} \quad (14)$$

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|}, \quad (15)$$

где U_{in} – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на входе синхронного детектора; $C_{in} = 30 + 25 \text{ pF}$ – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей; $U_g = 1 \text{ V}_{rms}$ – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора; $R_g = 50 \text{ } \Omega$ – внутреннее сопротивление генератора; $R = 46,5 \text{ } \Omega$ – сопротивление нагрузочного резистора, на котором измеряется напряжение; Z – импеданс всей схемы; Z_C – импеданс эквивалентной схемы конденсатора (см. формулы (3)-(4)); Z_L – импеданс эквивалентной схемы катушки индуктивности (см. формулы (7)-(8)); f – частота генератора.

10.2 Параллельный контур $C = 150 \text{ pF}$, $L = 3,13 \text{ mH}$

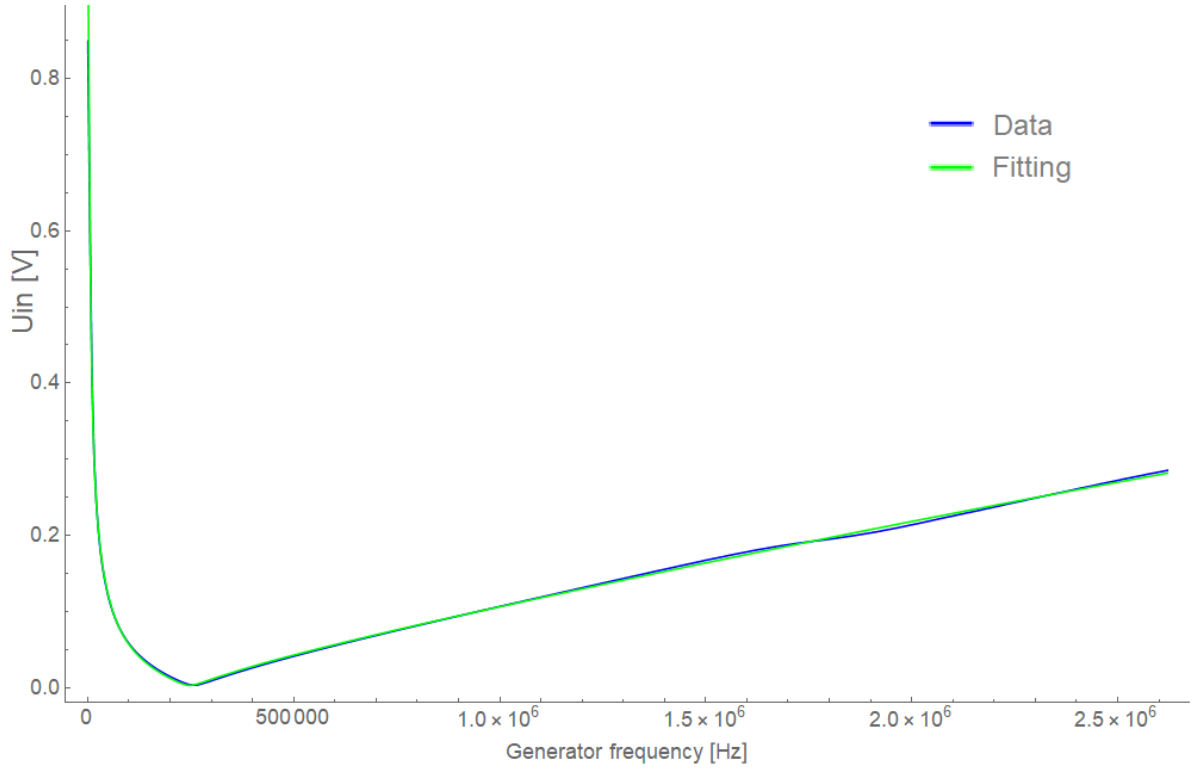


Рис. 18: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с параллельным включением конденсатора $C = 150 \text{ pF}$ и катушки индуктивности $L = 3,13 \text{ mH}$

Для схемы на рисунке 17 была измерена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности (график зависимости приведён на рисунке 18). Параметры контура при аппроксимации были зафиксированы значениями из прошлых измерений.

По этим данным получим значения резонансных частот контура:

$$F^{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_z)C_2}} = 214039 \pm 1000 \text{ Hz} \quad F^{ex} = 247949 \text{ Hz} \quad (16)$$

11 Измерение спектральных характеристик колебательного контура с неполным включением ёмкости

11.1 Эквивалентная схема

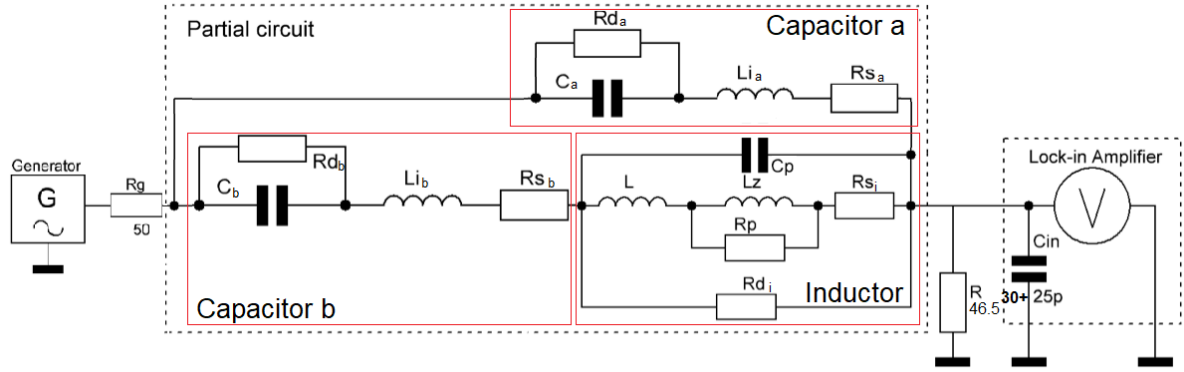


Рис. 19: Эквивалентная схема для исследования частотных характеристик колебательного контура с неполным включением ёмкости

На рисунке 19 изображена эквивалентная схема установки для измерения характеристик колебательного контура с неполным включением ёмкости. Расчет схемы показывает, что импеданс нагрузки генератора и напряжение на входе синхронного детектора будут равны:

$$Z = R_g + \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} + \frac{Z_{Ca} \cdot (Z_{Cb} + Z_L)}{Z_{Ca} + (Z_{Cb} + Z_L)} \quad (17)$$

$$U_{in} = 2U_g \frac{\left| \frac{R \frac{1}{i\omega C_{in}}}{R + \frac{1}{i\omega C_{in}}} \right|}{|Z|}, \quad (18)$$

где U_{in} – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на входе синхронного детектора; $C_{in} = 30 + 25 \text{ pF}$ – входная ёмкость синхронного детектора с учётом ёмкости коаксиальных кабелей; $U_g = 1 \text{ V}_{rms}$ – среднеквадратичное значение амплитуды напряжения на выходе генератора; $R_g = 50 \text{ } \Omega$ – внутреннее сопротивление генератора; $R = 46,5 \text{ } \Omega$ – сопротивление нагрузочного резистора, на котором измеряется напряжение; Z – импеданс всей схемы; Z_{Ca} – импеданс эквивалентной схемы конденсатора a ; Z_{Cb} – импеданс эквивалентной схемы конденсатора b ; Z_L – импеданс эквивалентной схемы катушки индуктивности; f – частота генератора; C_a и C_b – ёмкости конденсаторов.

11.2 Колебательный контур с неполным включением ёмкости ($C_a = 1,5 \text{ nF}$ и $C_b = 150 \text{ nF}$)

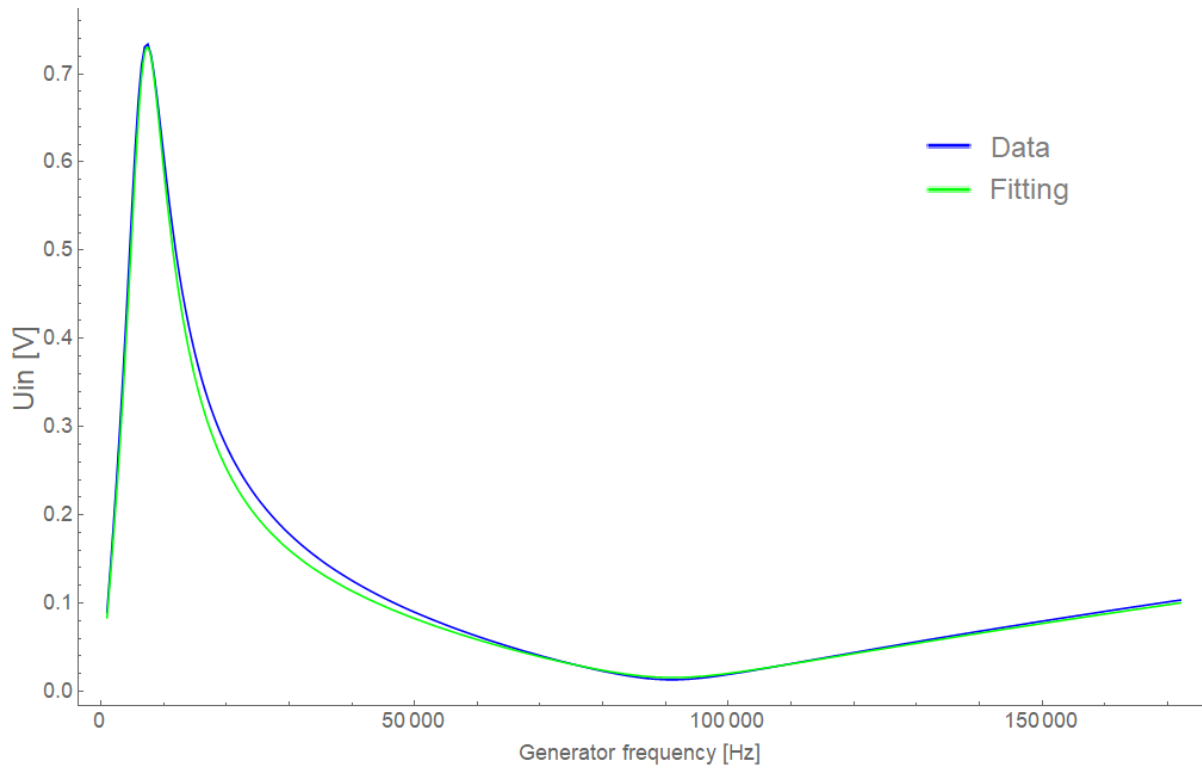


Рис. 20: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с неполным включением ёмкости, $C_a = 1,5 \text{ nF}$ и $C_b = 150 \text{ nF}$

Для схемы на рисунке 19 была измерена АЧХ (приведена на рисунке 20). Параметры контура при аппроксимации были зафиксированы значениями из прошлых измерений. По этим данным получим значения резонансной частоты контура:

$$F_1^{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_z)C_b}} = 7444 \text{ Hz} \quad F_1^{ex} = 7420 \text{ Hz} \quad (19)$$

$$F_2^{th} = F_1 \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{C_b}{C_a}} = 76508 \text{ Hz} \quad F_2^{ex} = 91141 \text{ Hz} \quad (20)$$

11.3 Колебательный контур с неполным включением ёмкости ($C_a = 150 \text{ pF}$ и $C_b = 1,5 \text{ nF}$)

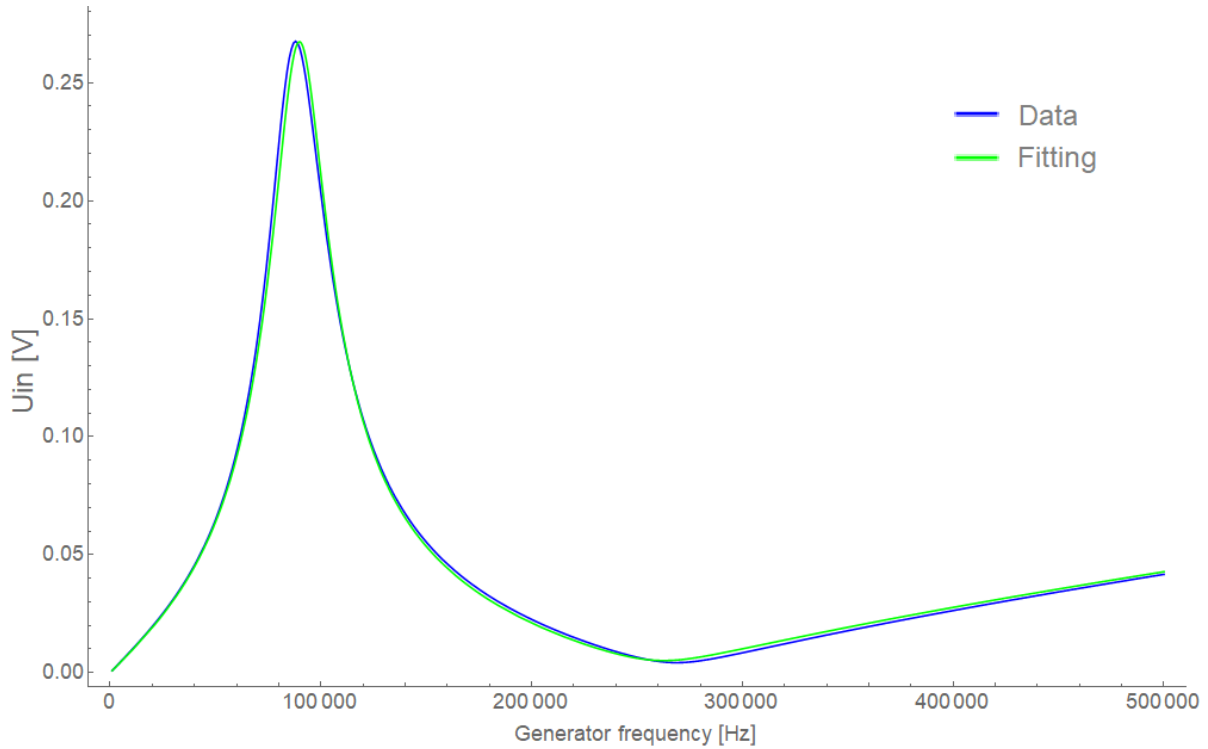


Рис. 21: Зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для цепи с неполным включением ёмкости, $C_a = 150 \text{ pF}$ и $C_b = 1,5 \text{ nF}$

Для схемы на рисунке 19 была измерена зависимость среднеквадратичного значения амплитуды напряжения на входе синхронного детектора U_{in} от частоты генератора f для подключенной к синхронному детектору электрической цепи (график зависимости приведён на рисунке 21). Параметры контура при аппроксимации были зафиксированы значениями из прошлых измерений. По этим данным получим значения резонансной частоты контура:

$$F_1^{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L + L_z) C_b}} = 76514 \text{ Hz} \quad F_1^{ex} = 89850 \text{ Hz} \quad (21)$$

$$F_2^{th} = F_2^{th} = F_1 \sqrt{1 + \frac{C_b}{C_a}} = 233837 \text{ Hz} \quad F_2^{ex} = 262964 \text{ Hz} \quad (22)$$

12 Выводы

В данной лабораторной работе был рассмотрен метод РЧ импедансной спектроскопии для измерения характеристик элементарных РТ компонент и простейших электрических цепей на их основе. Метод продемонстрировал малый разброс результатов при применении синхронного усилителя (порядка 2%). Были измерены импедансы трех конденсаторов, катушки и нескольких электрических цепей на их основе с помощью синхронного детектора. Значения параметров элементов, полученные из измерений последовательных, параллельных цепей и неполного включения ёмкости, примерно совпадают со значениями этих параметров, полученными из измерений этих элементов по отдельности.

Список литературы

- [1] Agilent Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques // 4th edition.