

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет
Кафедра общей физики
Бондарь Егор Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение индуктивности дросселя мостовым методом

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20304

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, Косинов А.Д.
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Максимов В.В.
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация.

Целью работы являлось изучение мостовых методов измерения индуктивности и их применение на практике. Для проведения работы была собрана макетная плата с двумя конфигурациями измерительных мостов (мост Максвелла-Вина и мост Хэя). В ходе тестовых измерений было выявлено важное ограничение на емкость конденсатора, используемого в схеме. Используя данную плату, были проведены эксперименты по измерению неизвестных индуктивностей. С помощью моста Максвелла-Вина были получены точные результаты для катушек с малой добротностью на малой частоте. При увеличении частоты мост вёл себя нелинейно, вопреки теоретическим выкладкам. Используя мост Хэя, были измерены индуктивности катушек с разной добротностью; для наибольшей добротности получен самый точный результат. Таким образом были изучены особенности работы с измерительными мостами и показано, что данный метод измерения является достаточно точным при определенном подходе.

Ключевые слова: измерение индуктивности, измерительный мост, добротность катушки, мост Максвелла-Вина, мост Хэя.

Содержание.

Введение.....	4
1.Теория.....	6
2.Экспериментальная установка.....	9
3.Результаты эксперимента.....	12
4.Заключение.....	24
Список использованной литературы.....	25

Введение.

Существует множество методов измерения индуктивности: резонансный, мостовой, метод фазового детектора и т.д. В данной работе изучаются мостовые методы, которые являются достаточно простыми конструктивно и при этом обеспечивают хорошую точность при правильном подходе.

Мостовые методы измерения являются очень полезными на практике, ведь на их основе работают множество сложных приборов для научных измерений, например термоанемометр. Термоанемометры используют для измерения скорости потока воздуха и массового расхода. Конструктивно они представляют из себя простой мост, в одно из плеч которого включается датчик в виде тонкой нити. При помещении датчика в воздушный поток, воздух уносит тепло, выделяемое нитью, тем самым охлаждая ее и вызывая изменение сопротивления, что влияет на баланс моста. При больших частотах, которые требуются для измерения на больших скоростях, поведение моста становится очень нетривиальным. Поэтому для работы с подобной аппаратурой необходимо хорошо знать особенности устройства измерительных мостов.



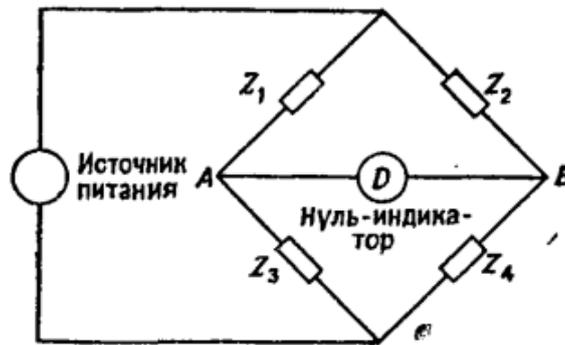
Рис. 1. Термоанемометр в лаборатории №14 ИТПМ СО РАН «Волновых процессов в сверхзвуковых течениях»

В ходе работы была собрана и несколько раз модифицирована мостовая схема. Данная схема была разработана таким образом, чтобы сочетать в себе 2 разных мостовых метода измерения: мост Максвелла-Вина и мост Хэя. В качестве генератора сигнала и нуль-индикатора использовался прибор National Instruments ELVIS. Данный прибор имеет дифференциальные входы для измерения напряжения (DMM), что упрощает процесс балансировки моста. При использовании обычного осциллографа в качестве нуль-индикатора, пришлось бы использовать вычитание каналов.

С помощью финальной версии схемы были измерены индуктивности различных дросселей и отмечены особенности процесса измерения. Результаты сравнивались с показаниями прибора NI ELVIS в режиме измерения индуктивности.

1. Теория.

Измерительный мост – это простая на первый взгляд конструкция, состоящая из четырех плеч и нуль-индикатора. Схема представлена на рис.2.



[1]

Рис. 2. Схема измерительного моста.

При достижении равновесия, ток через нуль-индикатор отсутствует, что означает:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Данное соотношение можно использовать для того, чтобы найти, например неизвестное сопротивление Z_4 :

$$Z_4 = Z_2 Z_3 / Z_1$$

Для измерения индуктивности недостаточно такой балансировки моста, ведь возникает фазовый сдвиг, который необходимо компенсировать. Тогда дополнительное условие равновесия принимает вид:

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$

Мост Максвелла-Вина. В модификации моста Максвелла, предложенной Вином, используется параллельное подключение сопротивления и емкости (Рис.3).

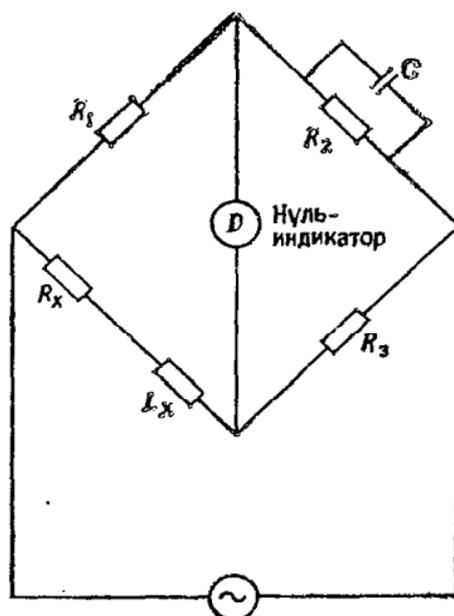


Рис. 3 Схема моста Максвелла-Вина

Так как ток через конденсатор опережает по фазе ток через индуктивность, необходима фазовая компенсация, поэтому индуктивные компоненты размещаются в противоположном плече.

Условия равновесия:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2$$

$$L_x = R_1 R_3 \cdot C$$

$$Q_x = \omega L_x / R_x = \omega R_2 C$$

Данный мост используется для измерения катушек с добротностью меньше 10, так как при большой добротности резистор R_2 должен иметь слишком большое сопротивление.

Мост Хэя. Мост аналогичен мосту Максвелла-Вина, но сопротивление R_2 соединяется с емкостью последовательно (Рис. 4).

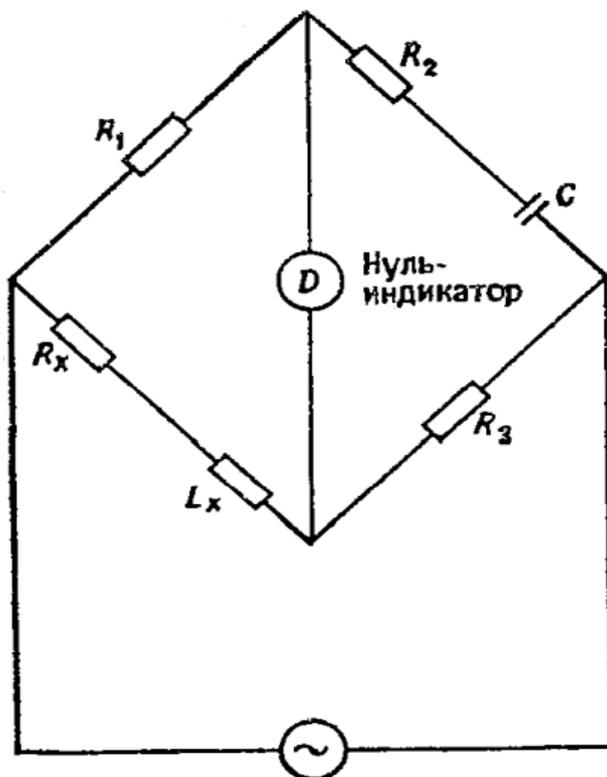


Рис. 4 Схема моста Хэя

Условия равновесия:

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2(1 + Q_x^2)}$$

$$L_x = \frac{R_1 R_3 \cdot C}{(1 + 1/Q_x^2)}$$

$$Q_x = \omega L_x / R_x = \frac{1}{\omega R_2 C}$$

При высокой добротности катушки, сопротивление R_2 можно выбрать очень малым. Недостатком данного моста является зависимость от частоты, но мост Хэя обычно используют для измерения индуктивности катушек с добротностью большей 10, благодаря чему можно пренебречь членом $1/Q_x^2$ и получить значение индуктивности, не зависящее от частоты, погрешность при этом составит менее 1%.

2. Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка и макетная плата моста приведены на Рис.5 и Рис.6:

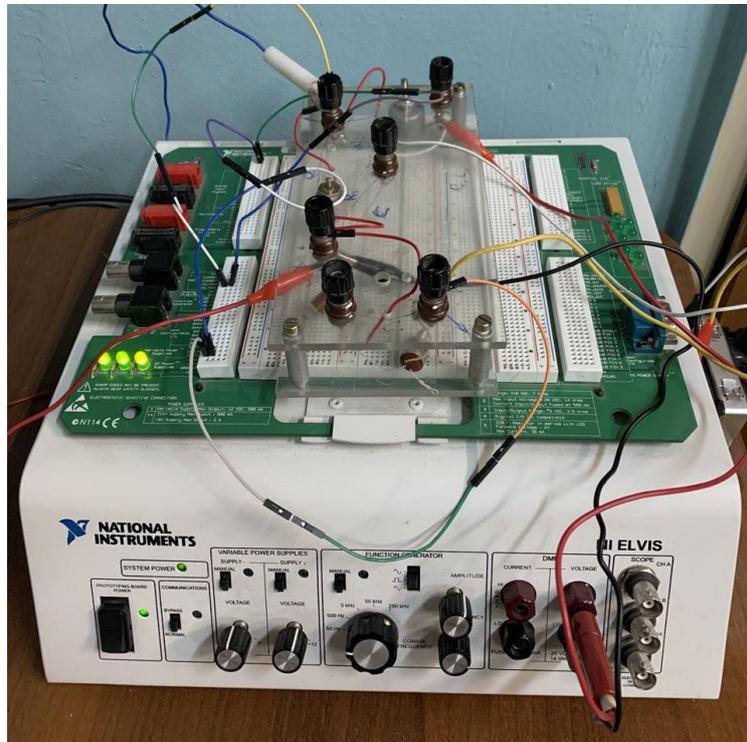


Рис. 5 Экспериментальная установка

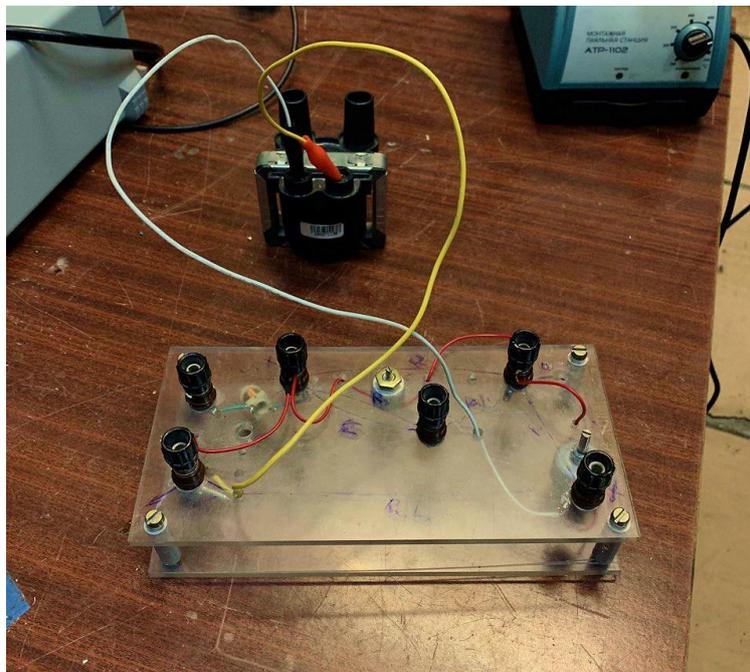
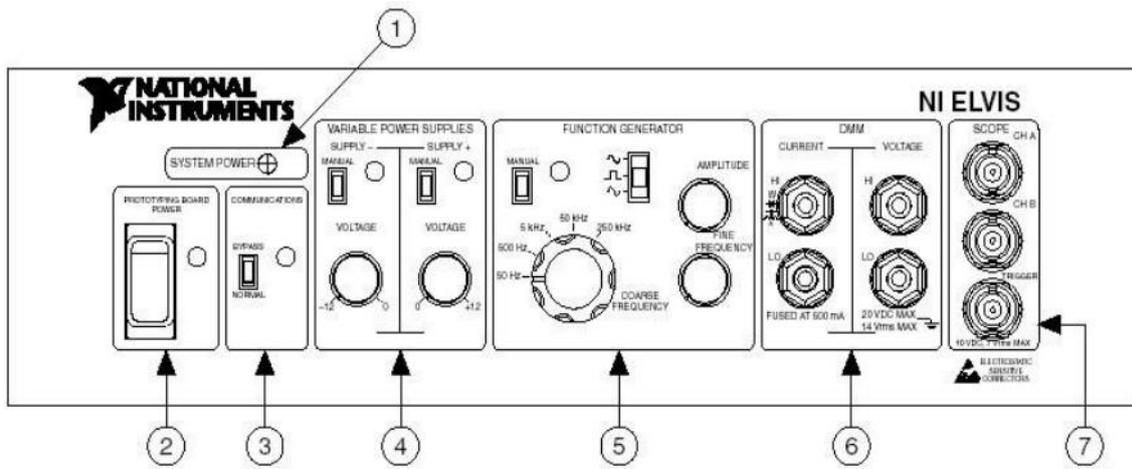


Рис. 6 Макетная плата измерительного моста

Источником переменного сигнала и нуль индикатором в нашей работе служил прибор NI ELVIS (Рис.5). Панель управления прибора представлена на Рис.7.



[2]

Рис. 7 Панель управления NI ELVIS

1 – индикатор питания системы; 2 – выключатель макетной платы прибора; 3 – переключатель связи; 4 – элементы управления регулируемых источников питания; 5 – элементы управления функциональным генератором; 6 – разъемы цифрового мультиметра (DMM); 7 – разъемы осциллографа.

Схема макетной платы моста изображена на Рис.8:

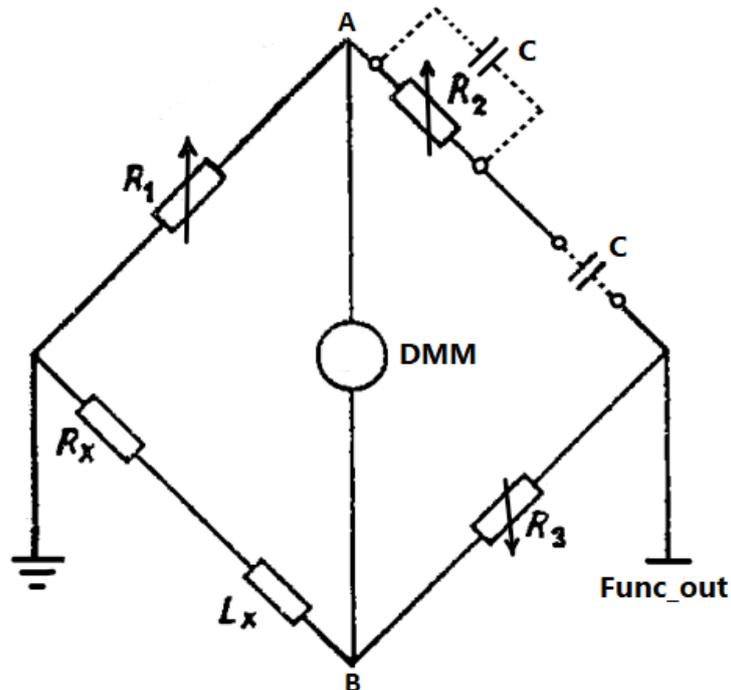


Рис. 8 Схема макетной платы

На макетную плату подавался прямоугольный сигнал с функционального генератора, а значение разности потенциалов между точками А и В снималось с помощью дифференциального входа DMM. Оба сигнала выводились в окне виртуального осциллографа прибора NI ELVIS.

Балансировка заключалась в подборе таких значений сопротивлений, чтобы на участке между пиками сигнала (DMM), осциллограмма принимала максимально близкий к прямой вид и находилась на нулевом уровне.

Используемые в установке переменные сопротивления имеют диапазоны регулировки: (1 – 100 Ом) R_1 , (1 – 6 кОм) R_2 , (1 – 2,7 кОм) R_3 . Перед сборкой платы, все элементы были проверены на наличие паразитной индуктивности, во избежание неточностей.

3. Результаты эксперимента.

В ходе тестовых измерений было обнаружено, что баланс собранного моста не зависит от подключения/отключения конденсатора емкостью в 150 пФ. Данная схема была смоделирована в онлайн программе для симуляции электрических схем (<https://falstad.com/circuit/>). Была получена аналогичная картина (Рис.9): после коммутации снимаемый сигнал никак не меняется. Был сделан вывод, что для собранного измерительного моста не корректно использовать маленькие емкости.

Данный эффект является очень странным, ведь при отключении емкости от моста, нарушается уравнивание фаз, что является необходимым условием равновесия.

Конденсатор был заменен на новый, емкостью в 150 нФ (Рис.10), что также потребовало замены переменных сопротивлений.

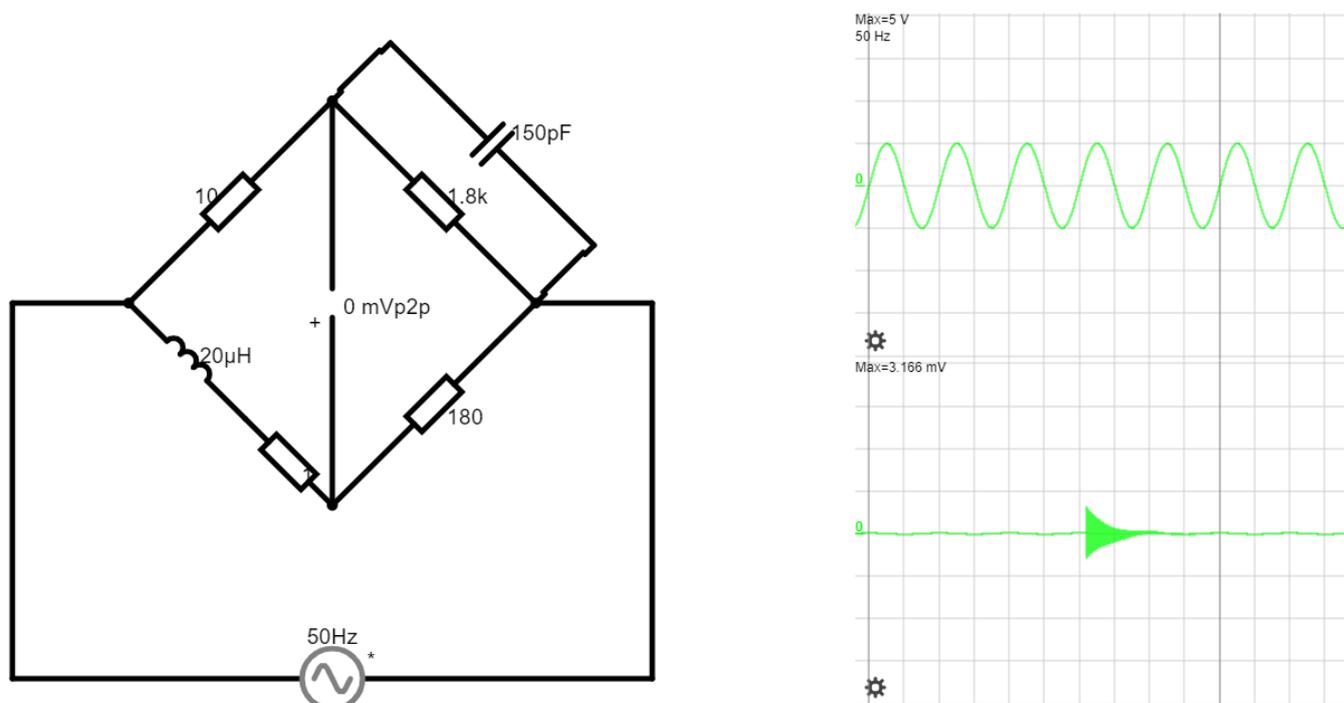


Рис. 9 Симуляция первой версии схемы

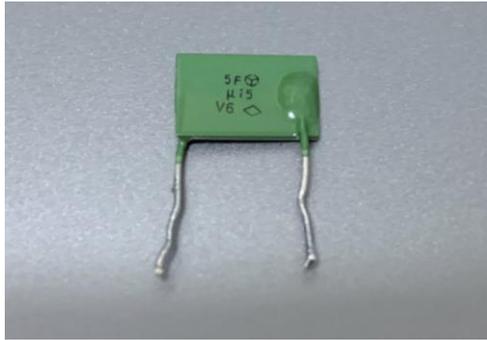


Рис. 10 Конденсатор, использованный в финальной версии моста

1 Эксперимент. Первое измерение проводилось с катушкой, комбинирующей в себе две обмотки с индуктивностями $L_1 = 14$ мкГн ($R_x = 100$ Ом) и $L_2 = 209$ мкГн ($R_x = 10$ Ом) (Рис.11, 12).



Рис. 11, 12 Исследуемый дроссель

На рисунке 13 представлено окно виртуального осциллографа NI ELVIS. На первый канал (зеленый) подается сигнал с функционального генератора, второй канал (синий) отображает разность потенциалов между точками А и В.

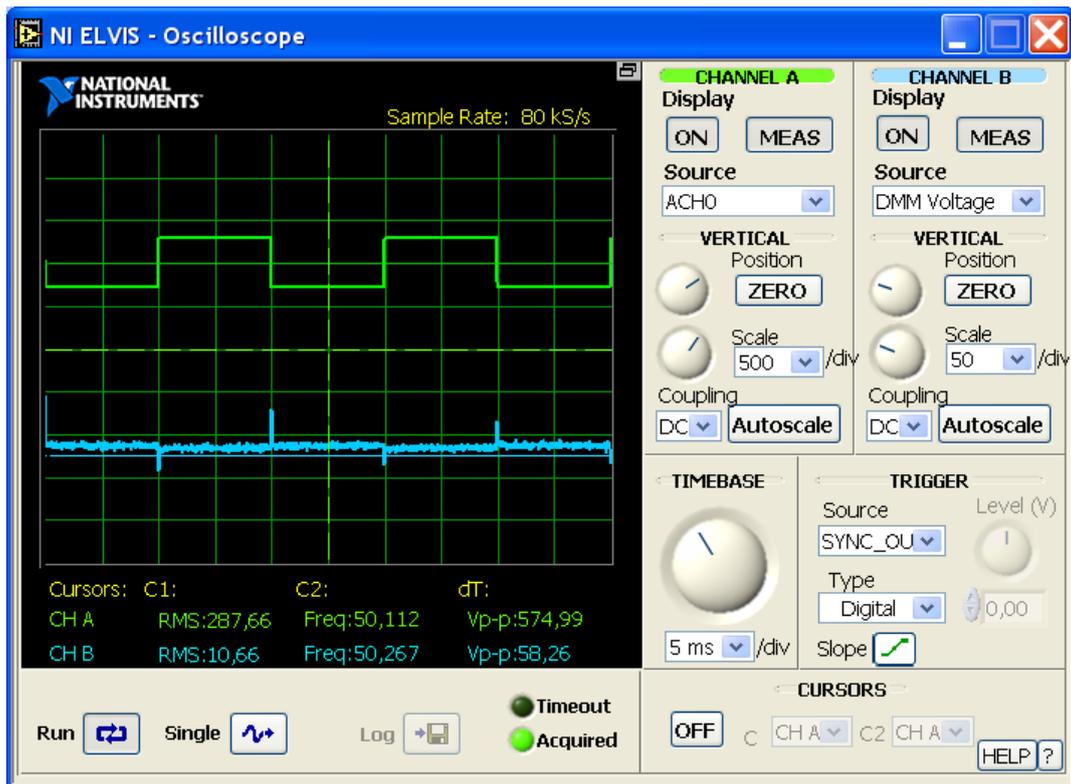


Рис. 13 Сбалансированный мост 14 мкГн (CH A 500мВ, CH B 50 мВ)

Изменяя сопротивления, мы добиваемся компенсации сигнала на втором канале, как видно на рисунке. Используя мультиметр, были сняты значения сопротивлений и посчитана индуктивность дросселя:

$$R_1 = 0,9 \text{ Ом}; R_2 = 14,6 \text{ Ом}; R_3 = 108 \text{ Ом};$$

$$L_x = R_1 R_3 C = 0,9 \cdot 108 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \approx 14,5 \text{ мкГн}$$

Полученное значение совпадает со значением измеренным прибором NI ELVIS с точность до 10^{-7} Гн.

На осциллограмме также можно заметить пики напряжения, которые возникают из-за дифференцирования прямоугольного сигнала в момент его резкого изменения.

На Рис. 14 – 15 представлены осциллограммы сбалансированного моста для второй катушки. Можно заметить, что баланс измерительного моста не зависит от формы сигнала.

Полученные данные:

$$R_1 = 1,5 \text{ Ом}; R_2 = 1003 \text{ Ом}; R_3 = 950 \text{ Ом};$$

$$L_x = R_1 R_3 C = 1,5 \cdot 1003 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \approx 213 \text{ мкГн}$$

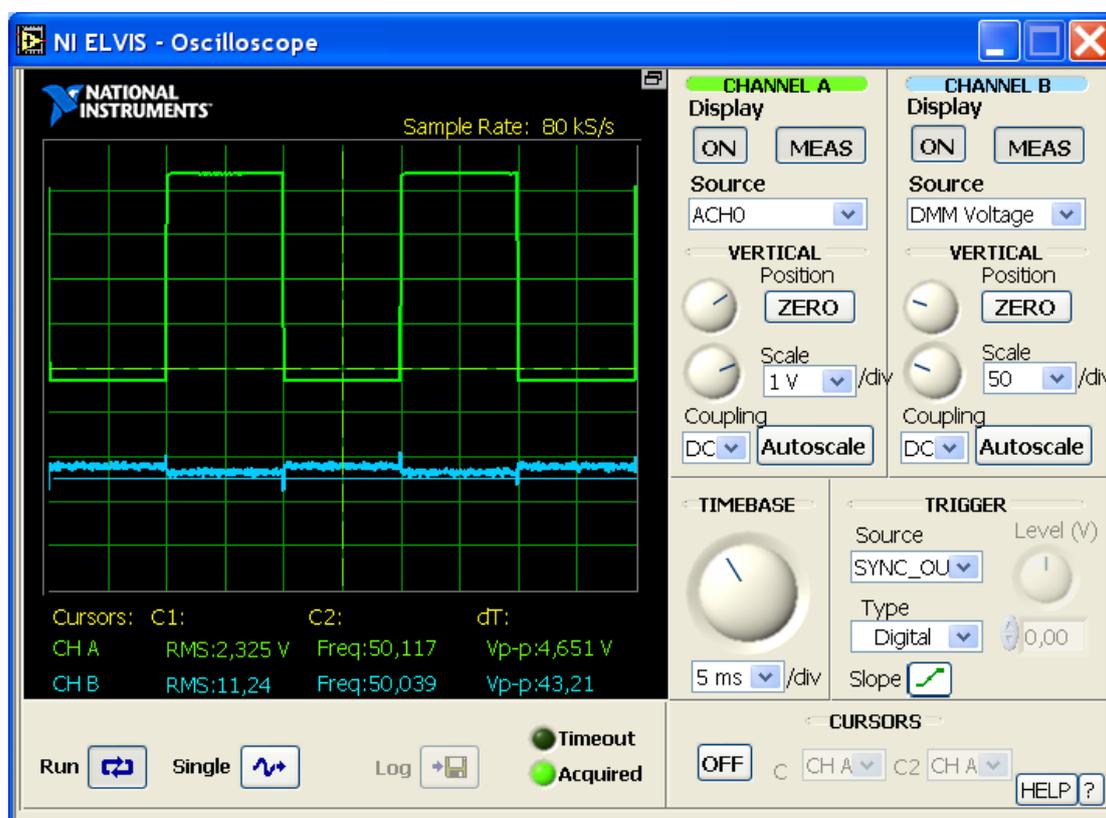


Рис. 14 Сбалансированный мост 209 мкГн (CH A 1 В, CH B 100 мВ)

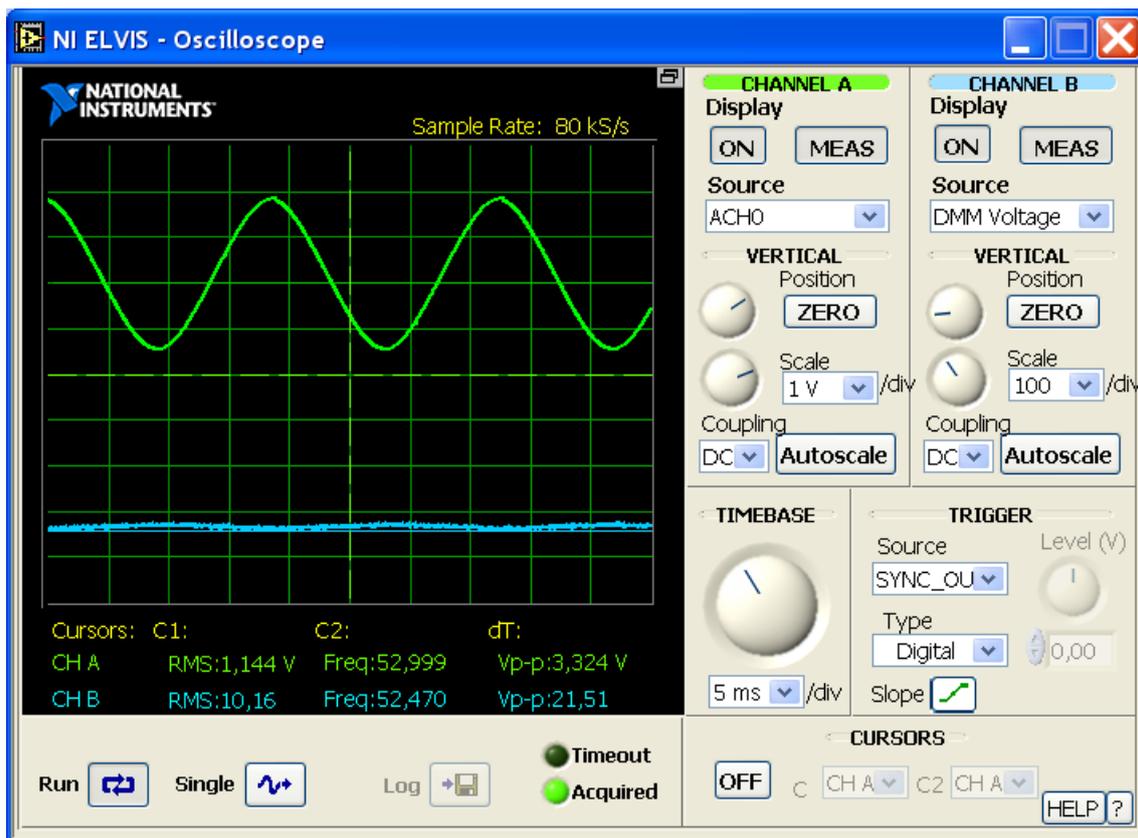


Рис. 15 Сбалансированный мост 209 мкГн, sin (CH A 1 В, CH B 100 мВ)

На Рис. 16 – 17 представлены осциллограммы моста с теми же параметрами, но при частоте 600 Hz. Как видно, при увеличении частоты, мост Максвелла-Вина ведет себя нелинейно и выходит из уравновешенного состояния.

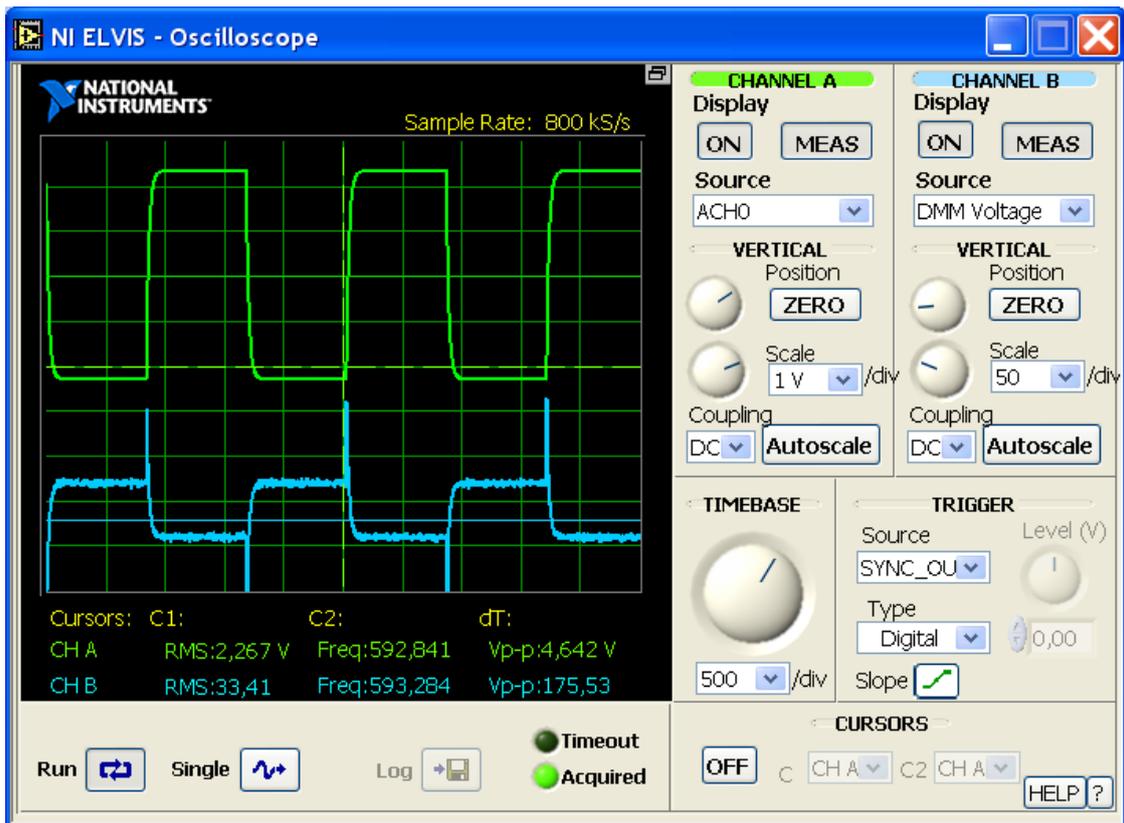


Рис. 16 Разбалансированный мост 209 мкГн, 600 Hz (CH A 1 В, CH B 50 мВ)

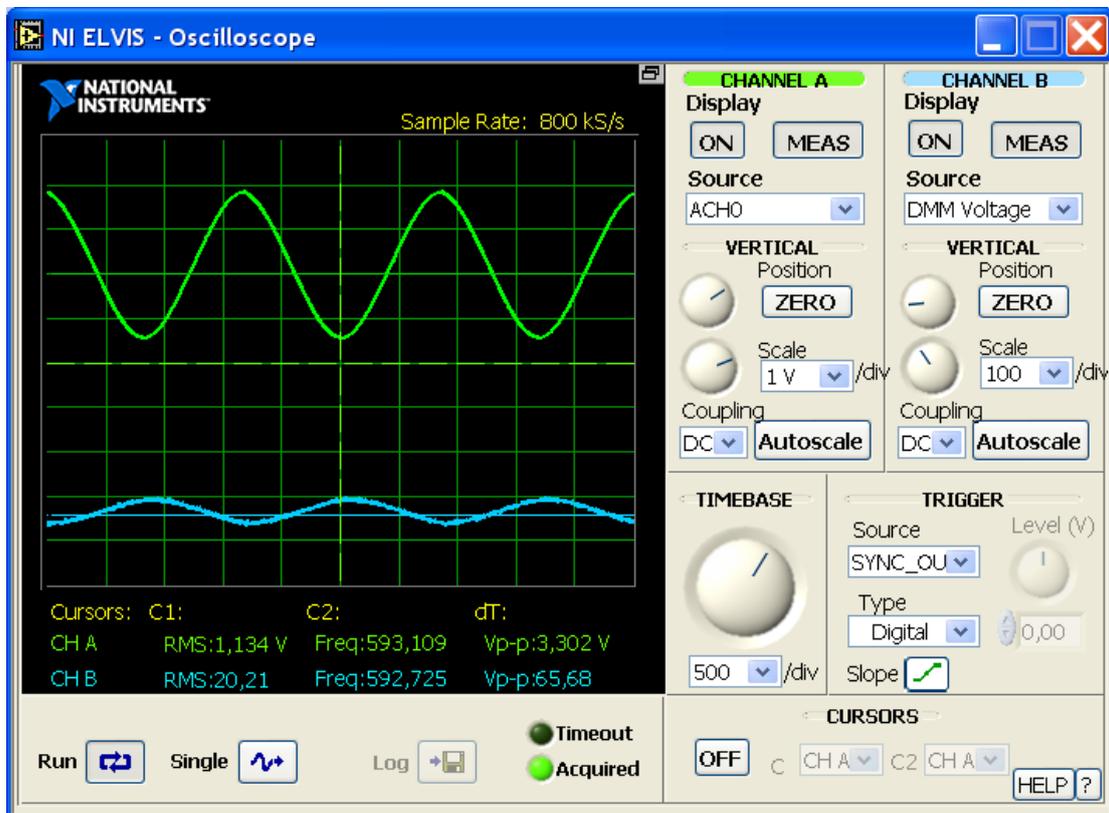


Рис. 17 Разбалансированный мост 209 мкГн, sin, 600 Hz (CH A 1 В, CH B 100 мВ)

2 Эксперимент. Исследуемая катушка (Автомобильный трансформатор) представлена на Рис.18. $L_x = 2,5$ мГн, $R_x = 1$ Ом.



Рис. 18 Исследуемый дроссель

Сперва измерения были проведены с помощью моста Хэя (Рис. 19 – 20). Добротность катушки $Q_x = \omega L_x / R_x$ равна 9,42 для частоты 600Hz и 0,78 для частоты 50Hz.

Полученные результаты:

600Hz:

$$R_1 = 29 \text{ Ом}; R_2 = 3,13 \text{ кОм}; R_3 = 3,75 \text{ кОм};$$

$$L_x = \frac{R_1 R_3 C}{1 + \frac{1}{Q_x^2}} \approx 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

50Hz:

$$R_1 = 8 \text{ Ом}; R_2 = 3,13 \text{ кОм}; R_3 = 3,75 \text{ кОм};$$

$$L_x = \frac{R_1 R_3 C}{1 + \frac{1}{Q_x^2}} \approx 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Как видно результат для частоты 600Hz получился более точным, при этом, из-за невозможности до конца скомпенсировать мост (Рис.19), все равно является достаточно грубым.

Результат же для меньшей частоты и добротности катушки, отличается от измеренного прибором NI ELVIS почти в 2 раза, несмотря на хорошо скомпенсированный сигнал (Рис.20).

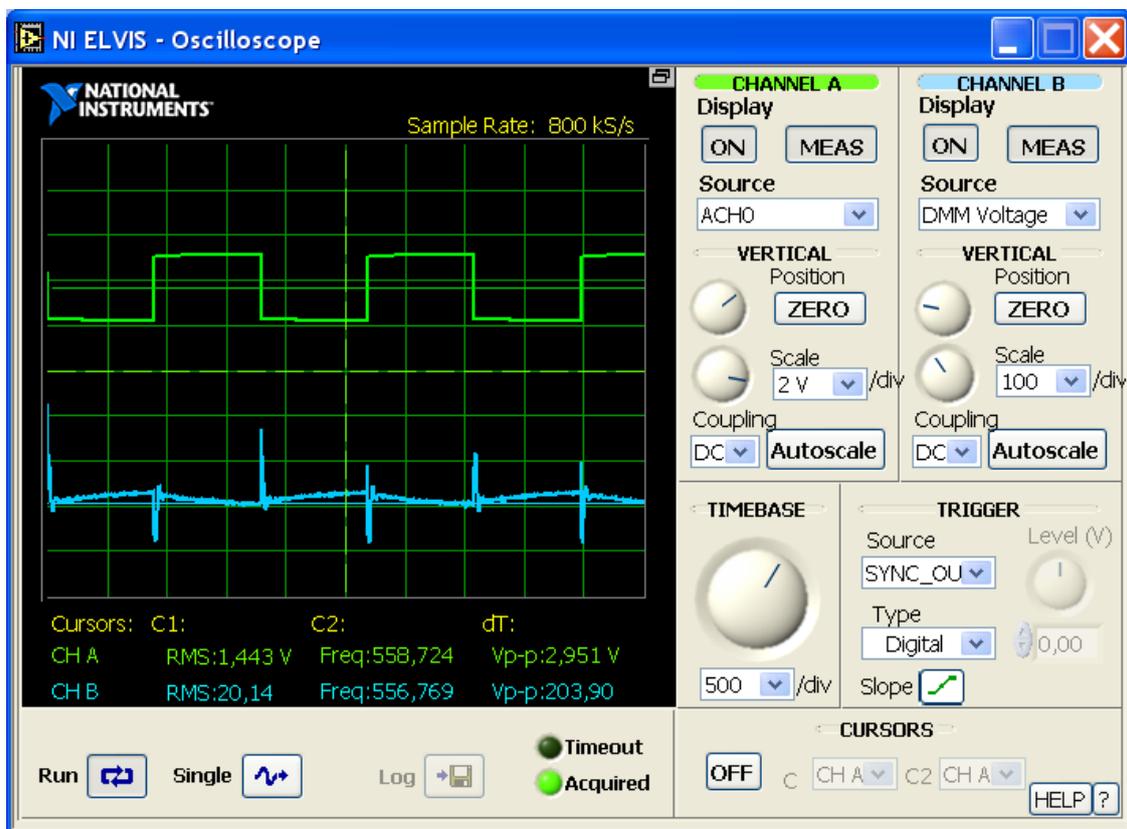


Рис. 19 Сбалансированный мост (Хэй) 600Hz (CH A 2 В, CH B 100 мВ)

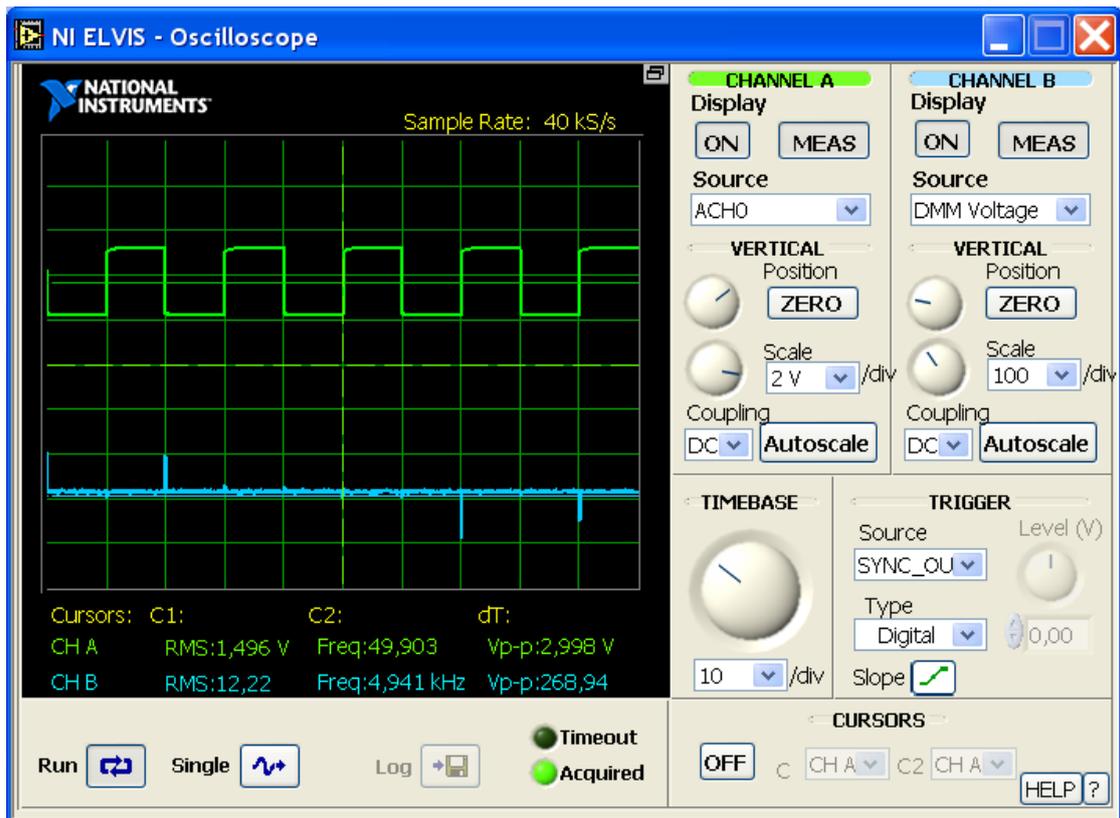


Рис. 20 Сбалансированный мост (Хэй) 50Hz (CH A 2 В, CH B 100 мВ)

На Рис. 21-22 представлены осциллограммы для моста Максвелла-Вина, можно сразу заметить, что на частоте 600Hz балансировка моста представляется достаточно сложным процессом и не приводит к полной компенсации, в следствии чего можно говорить о непригодности моста Максвелла-Вина для измерения индуктивности данного дросселя с большой добротностью.

На частоте 50Hz мост легко балансируется, и мы получаем близкий к искомому результат:

$$R_1 = 6 \text{ Ом}; R_2 = 642 \text{ Ом}; R_3 = 3,5 \text{ кОм};$$

$$L_x = R_1 R_3 C \approx 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

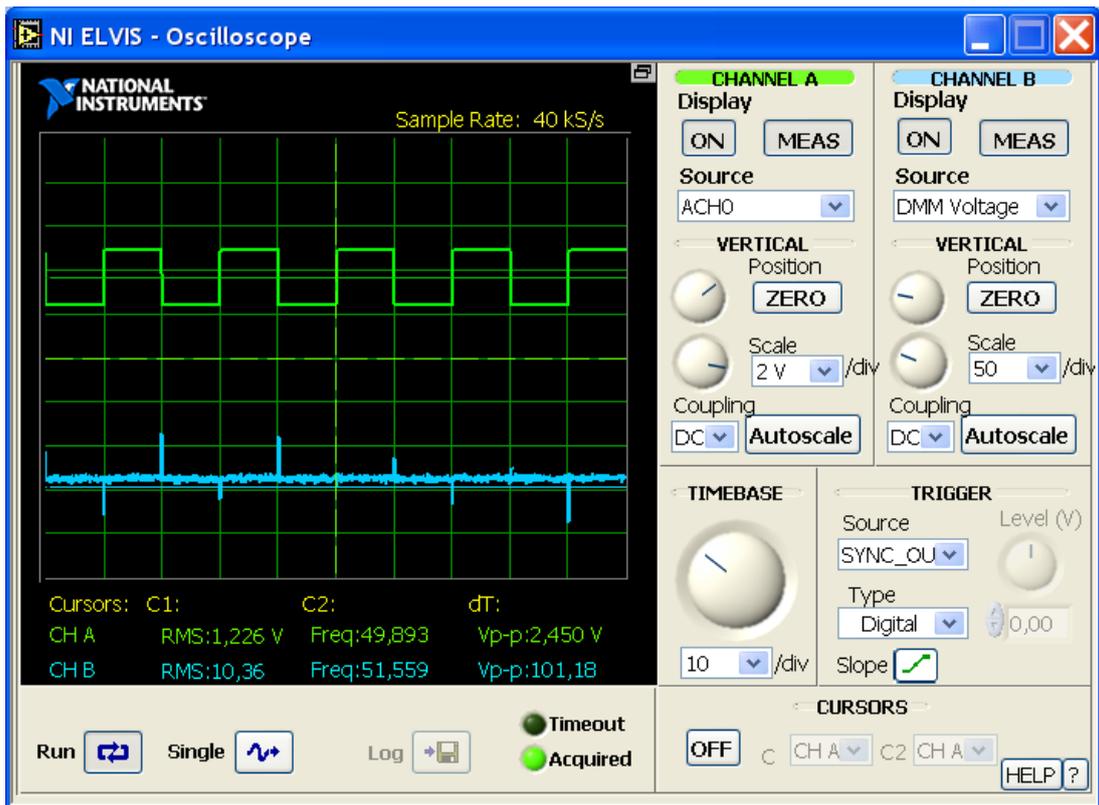


Рис. 21 Сбалансированный мост (М-В) 50Hz (CH A 2 В, CH B 50 мВ)

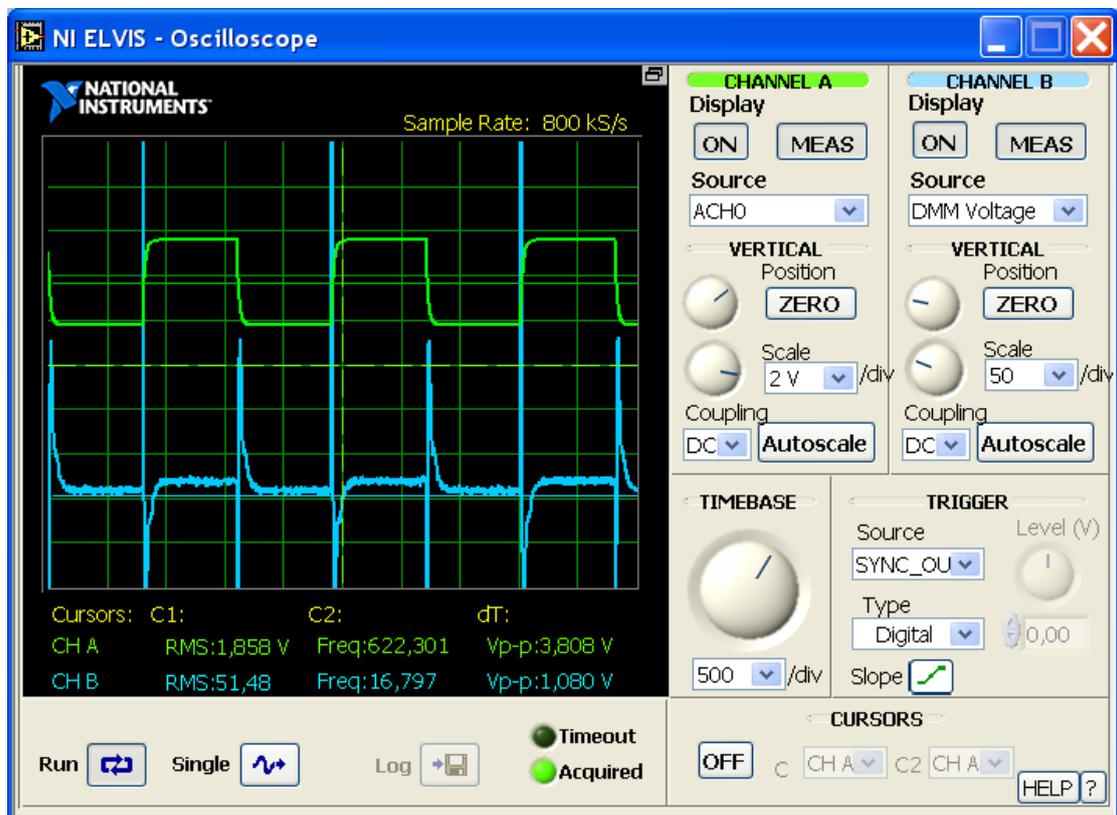


Рис. 22 Сбалансированный мост (М-В) 600Hz (CH A 2 В, CH B 50 мВ)

Все проведенные измерения занесены в итоговую таблицу:

Индуктивность, Гн	Частота, Гц	Тип моста	Добротность	Измеренная индуктивность, Гн
$14 \cdot 10^{-6}$	50	Максвелл-Вин	$4,39 \cdot 10^{-5}$	$14,5 \cdot 10^{-6}$
$209 \cdot 10^{-6}$	50	Максвелл-Вин	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$213 \cdot 10^{-6}$
$209 \cdot 10^{-6}$	600	Максвелл-Вин	$7,8 \cdot 10^{-2}$	Мост Разбалансирован
$2,5 \cdot 10^{-3}$	50	Хэй	0,78	$4,4 \cdot 10^{-3}$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	600	Хэй	9,42	$3,9 \cdot 10^{-3}$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	50	Максвелл-Вин	0,78	$3,15 \cdot 10^{-3}$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	600	Максвелл-Вин	9,42	Мост Разбалансирован

Заключение.

- 1) В ходе работы была изготовлена макетная плата измерительного моста Максвелла-Вина, с возможностью изменения конфигурации на мост Хэя. Отмечены особенности конструкции.
- 2) Освоены принципы работы с прибором NI ELVIS, который оказался удобным многофункциональным инструментом для проведения научных измерений.
- 3) Проведены серии измерений индуктивности дросселей при помощи обоих мостов. Доказано, что мост Хэя лучше измеряет индуктивность катушек с большой добротностью, а мост Максвелла-Вина, с малой.
- 4) Исследовано поведение мостов при изменении частоты подаваемого сигнала и его формы.

Список использованной литературы.

1. Ф. Мейзда. «Электронные измерительные приборы и методы измерений». 1990г.
2. Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS Технические средства Руководство пользователя April 2006 373363D-01
3. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-C. Engineering and Instrumentation Vol. 65C, No.3, Thomas L. Zapf. Calibration of Inductance Standards in the Maxwell-Wien Bridge Circuit (February 28, 1961).