

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ревякин Александр Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Методы измерения тока и напряжения в цепях с гальванической
развязкой**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19307

Научный руководитель:

ведущий инженер-электроник ИЛФ
СО РАН Красников Ю. И.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Солдаткина Е.И.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось знакомство с методами измерения тока и напряжения в цепях с гальванической развязкой, разработка электронных схем для осуществления таких измерений. Для этого были собраны платы на основе датчиков LEM LA-55-P и LEM LV-25-P, использовавшиеся для измерений тока и напряжения источнике питания CO₂ лазера мощностью 5 кВт. Также был изготовлен повторитель напряжения на основе транзистора BF998, в его конструкции выявлены недочеты, предложен путь их устранения.

Ключевые слова: измерение тока, гальваническая развязка, LEM LA-55-P, LEM LV-25-P, повторитель напряжения, BF998.

Оглавление

Введение	4
Теоретическая часть. Принцип работы датчика на основе элемента Холла	5
Схема для измерения больших токов с LEM LA-55-P	7
Результаты измерений с LEM LA-55-P	9
Схема для измерения напряжения с LEM LV-25-P с тремя каналами	10
Истоковый повторитель напряжения на транзисторе BF998	11
Заключение	13
Список литературы	14

Введение

На практике часто требуется использовать гальваническую развязку двух цепей. Гальваническая развязка – способ передачи сигнала или энергии между цепями без электрического контакта между ними.

Она применяется в следующих случаях:

- Чтобы обеспечить защиту измерительных приборов при измерении тока и напряжения в электрических цепях, имеющих большой потенциал относительно земли.
- Для устранения или снижения помех, «земляных шумов».
- Для минимизации влияния измерительного устройства на измеряемые параметры тока и напряжения.

Существует несколько видов гальванических развязок. Трансформаторные и оптические развязки применяются наиболее широко.

Трансформаторная развязка представляет из себя трансформатор с одинаковым числом витков на вторичной и первичной обмотках. Она обладает рядом недостатков: работает только в цепях переменного тока, имеет существенные габариты, частота пропускания ограничена частотной модуляцией [1].

Оптическая развязка (оптрон, оптопара) работает при низкочастотном и постоянном токе, имеет малые размеры и высокое напряжение пробоя, не чувствительна к внешним электрическим и магнитным полям, обратная реакция приемника на излучатель отсутствует. Недостатки: рабочая частота ограничена несколькими кГц у линейных оптронов и несколькими сотнями МГц у высокочастотных, высокий уровень собственных шумов, значительная потребляемая мощность, чувствительность к температуре [2].

Емкостная развязка имеет малые габариты, может быть использована для передачи энергии, невосприимчива к внешним магнитным полям. Однако она не пропускает постоянную составляющую сигнала, пропускает помехи

вместе с полезным сигналом (частоты сигнала и помех приходится разносить) [3].

Гальваническая развязка на эффекте Холла реализуется с помощью полупроводникового датчика Холла и магнитопровода, магнитное поле в котором создается измеряемым током. Эта развязка обладает простой конструкцией, мало подвержена износу, однако ЭДС датчика, выдаваемая для одного и того же тока, зависит от температуры и относительно мала, поскольку мало магнитное поле, создаваемое проводом с током. Поэтому датчики Холла не подходят для измерения малых токов и не могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур. В связи с перечисленными особенностями датчики на основе элемента Холла на данный момент лучше всего подходят для использования в промышленных и бытовых целях, поскольку легко обеспечивают точность измерений 1-5% [4].

Теоретическая часть. Принцип работы датчика на основе элемента Холла

В связи с тем, что в работе использовались датчики тока на основе эффекта Холла, имеет смысл пояснить принцип его работы. Он заключается в следующем: ток I_P , протекая по первичной обмотке трансформатора (магнитопровод и вторичная обмотка находятся внутри корпуса устройства, а первичной обмоткой является провод с измеряемым током), создает в нем магнитное поле, в которое помещен датчик Холла. В результате того, что через два вывода элемента Холла протекает ток, на двух других выводах возникает разность напряжений (ЭДС Холла). Теперь, если через компенсационную катушку пропустить ток I_S , который бы компенсировал магнитное поле в магнитопроводе, ЭДС Холла исчезнет. Зная коэффициент трансформации тока $N = \frac{I_P}{I_S}$ катушки, находящейся в датчике, и ток I_S , можно определить ток I_P как $I_P = NI_S$. Коэффициент трансформации определяется из параметров катушки и магнитопровода, ток I_S определяется по падению напряжения на резисторе R_M . Чтобы не подбирать ток I_S вручную,

используется операционный усилитель, реализующий обратную связь (выводы VCC+ и VCC- предназначены для питания усилителя). При недостаточном для компенсации магнитного поля токе I_S на выходе элемента Холла присутствует разность напряжений, приложенная к входу усилителя, что приводит к увеличению напряжения на его выходе до тех пор, пока разность напряжений между входами не исчезнет – то есть до тех пор, пока магнитные поля в катушке не компенсируются [5]. Таким образом, ток I_S устанавливается на одном значении, равном $I_S = \frac{I_P}{N}$. Так как ток I_S протекает через измерительный резистор R_M , то падение напряжения на нем будет равно $U_M = I_S R_M$. Это падение напряжения можно измерить с помощью осциллографа. Тогда исходный ток выразится как $I_P = \frac{U_M}{R_M} N$.

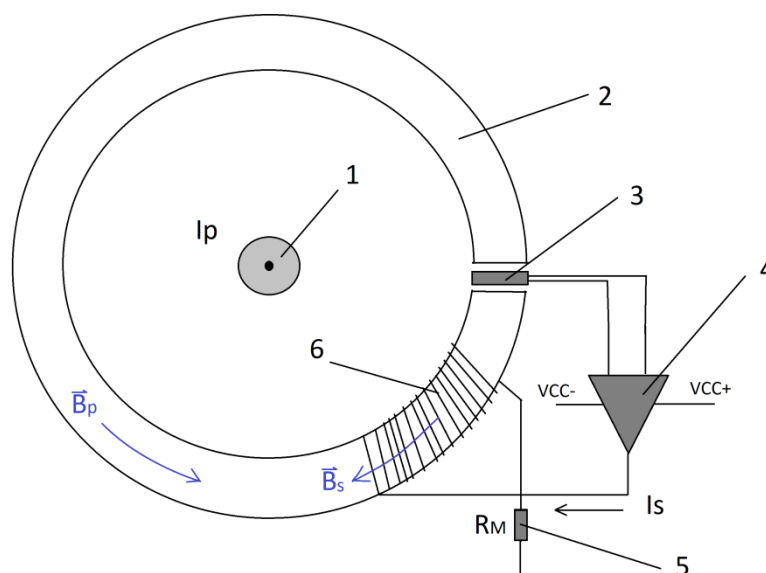


Рис. 1. Схема датчика тока на основе элемента Холла. 1 – провод с измеряемым током (направление тока – к нам), 2 – кольцо из магнитопровода, 3 – элемент Холла (два вывода для тока не показаны), 4 – операционный усилитель, 5 – измерительный резистор, 6 – компенсационная катушка.

Чтобы понять целесообразность использования подобных датчиков, нужно оценить коэффициент N . Он определяется из условия компенсации магнитных полей токов I_P и I_S в тороидальной катушке:

$$B_S = B_P$$

Пусть радиус тора R , тогда поле от тока I_P можно найти из теоремы о циркуляции:

$$\int H_P dl = \frac{4\pi I_P}{c}$$

$$H_P = \frac{2I_P}{Rc}$$

$$B_P = \mu \frac{2I_P}{Rc}$$

Поле от тока I_S компенсационной катушки с числом витков n будет равно[6]:

$$B_S = \mu \frac{2I_S}{Rc} n$$

Подставляя эти выражения в равенство $B_S = B_P$, получаем:

$$\frac{I_P}{I_S} = n$$

Из такой оценки следует, что коэффициент преобразования тока N равен числу витков n в компенсационной катушке. Значит, при типичных значениях n порядка 1000 с помощью датчика, изображенного на рис. 1, можно измерять токи порядка 10 Ампер, пропуская через компенсационную катушку токи порядка 10 мА. Это обосновывает целесообразность использования таких датчиков для измерений токов более 1А.

Схема для измерения больших токов с LEM LA-55-P [7]

Работу датчиков тока с элементом Холла можно продемонстрировать на примере измерения токов порядка 10 Ампер и их пульсации на выходе мощного источника питания. В источнике питания имеется предустановленный датчик тока, рядом с которым подключается дополнительный.

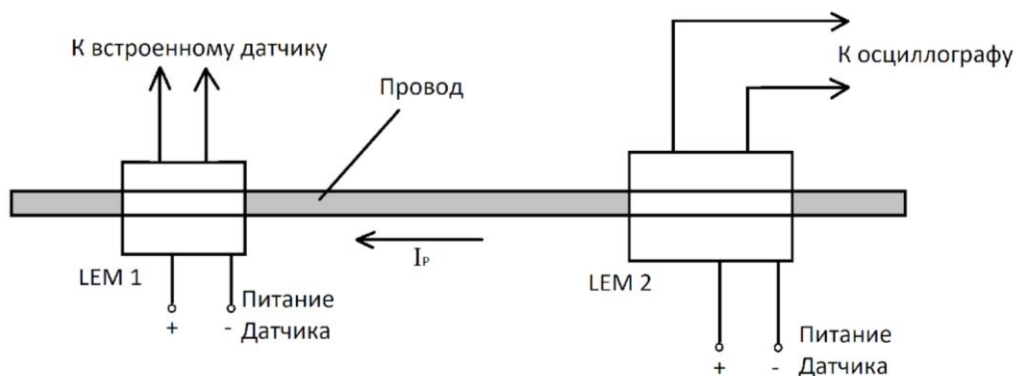


Рис. 2. Схема измерения тока в проводе. LEM 1 – встроенный датчик тока; LEM 2 – датчик LEM-LA-55-P для контроля измерений. Ток $I \sim 10A$

В качестве дополнительного датчика для контроля измерений основного, а также для регистрации пульсаций, использовался датчик тока LEM LA-55-P на основе элемента Холла. Для его работы была изготовлена печатная плата (прил. 1), принципиальная схема которой приведена ниже.

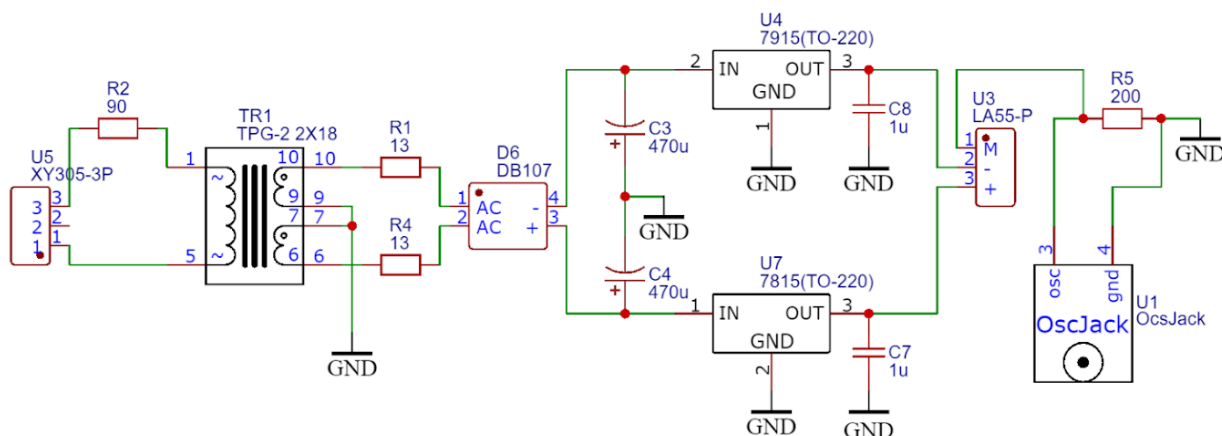


Рис. 3. Принципиальная схема датчика тока на основе LEM LA-55-P с питанием от сетевого напряжения 220В.

Трансформатор TR1, диодный мост D6 и конденсаторы C3-C4 нужны для понижения напряжения и сглаживания пульсаций выпрямленного тока [8]. Стабилизаторы U1-U2 (микросхемы 7815CT [9]) устраняют остаточные колебания напряжения, так что на выходе образуется напряжение $\pm 15V$ для питания датчика. Напряжение с прецизионного резистора R5 снимается осциллографом и пересчитывается в ток I_p .

Результаты измерений с LEM LA-55-P

Такой датчик вместе с осциллографом позволил измерить постоянную и переменную составляющую тока (рис. 4, рис. 5).

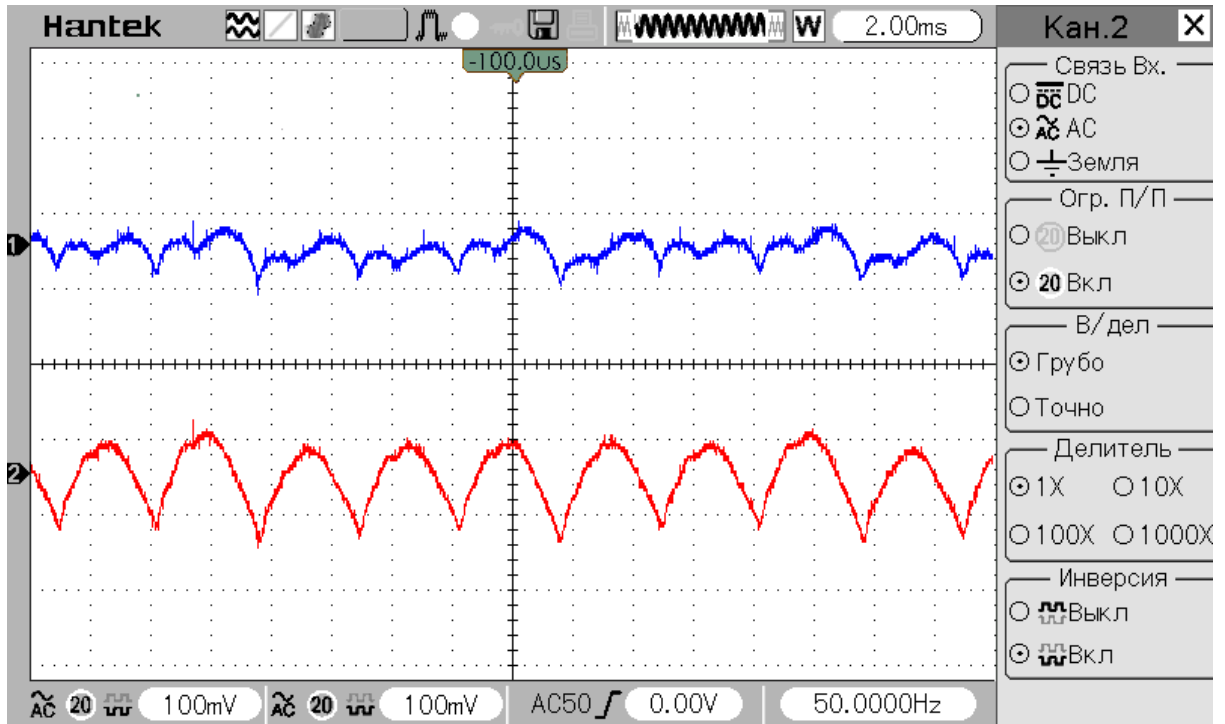


Рис. 4 Пульсации выходного тока источников питания, измеренные с помощью LEM LA-55-P. Вертикальная шкала 1 Ампер/деление; горизонтальная шкала 10мс/ деление.

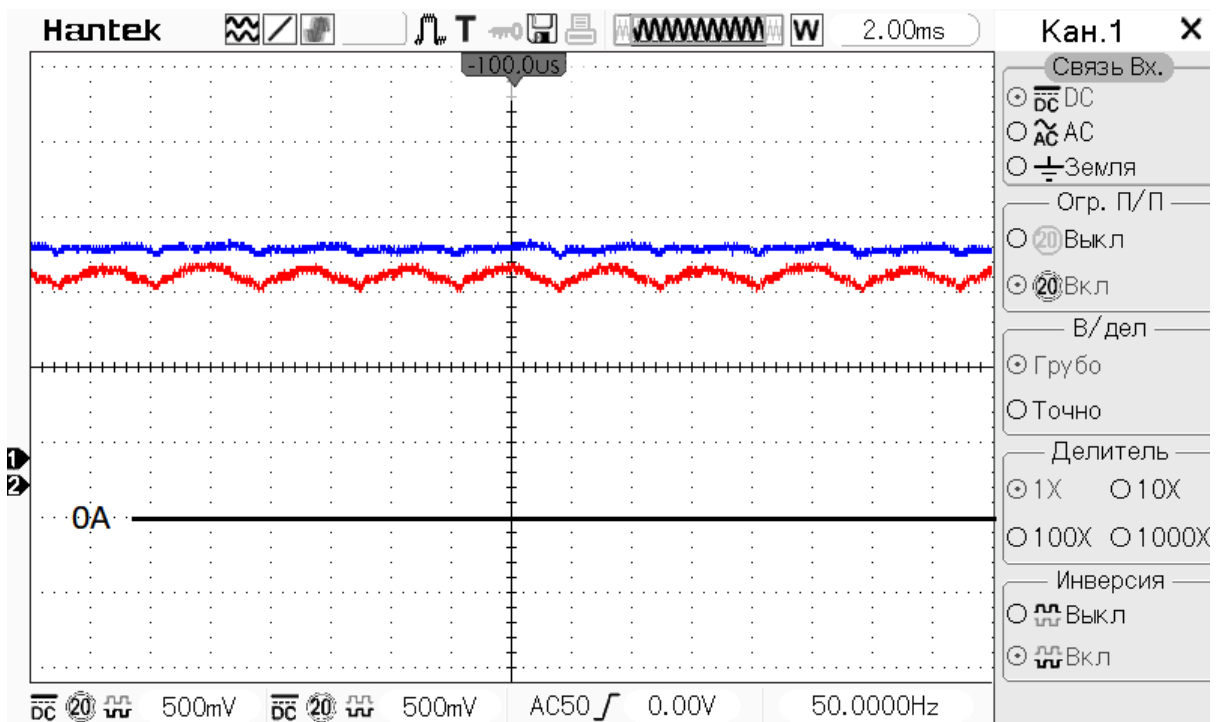


Рис.5. Осциллограмма постоянной составляющей тока в двух источниках питания. Вертикальная шкала: 5 Ампер/деление; горизонтальная шкала 10мс/ деление

Схема для измерения напряжения с LEM LV-25-P [10] с тремя каналами

Для измерения в сетях переменного трехфазного тока промышленной частоты (50 Гц или 400 Гц) и напряжения (220 и 380 В), а также для исследования высокочастотных шумов, пульсаций, измерения длительностей фронта и спада импульса в таких сетях, требуются измерительные устройства с соответствующим диапазоном измеряемых напряжений, высокой разрешающей способностью, широкой полосой пропускания. Такие устройства также должны обеспечивать безопасность аппаратуры при работе с высоким напряжением. Примером таких измерений может служить выявление неисправностей работы тиристоров в тиристорном регуляторе мощности.

Для таких задач подходят преобразователи напряжения с элементом Холла. Однако их недостатком является необходимость в питании постоянным током. Поэтому требовалось изготовить плату, на которой размещались бы несколько этих датчиков (для измерений в многоканальном режиме) вместе с источником питания. Схема такой платы приведена ниже.

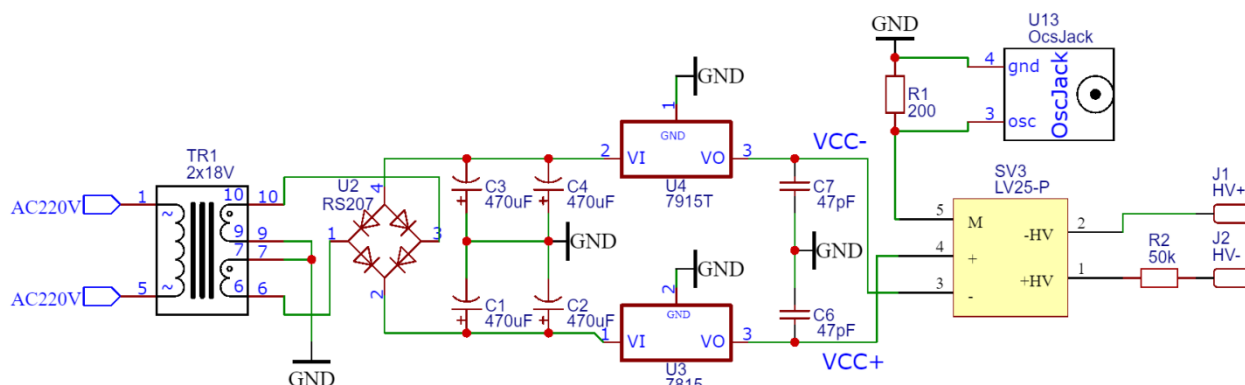


Рис. 6. Принципиальная схема для измерений с помощью LEM LV-25-P

Схема схожа со схемой для LA-55-P (рис. 3): напряжение выпрямляется и стабилизируется и подается на входы питания датчика. Номиналы резисторов R1 и R2 подобраны так, чтобы напряжение 500В между входами HV+, HV- переводилось в падение напряжения 5В на измерительном резисторе R1.

На схеме показан только один датчик LEM LV-25-P. На реальной плате к выводам VCC+ и VCC- должны подключаться еще два датчика (прил. 2). Это

позволит осуществлять измерения в трех каналах одновременно, что удобно при использовании осциллографа.

Истоковый повторитель напряжения на транзисторе BF998 [11]

В случае, когда источник сигнала имеет высокое полное сопротивление (например, при измерении напряжения на конденсаторе, емкость которого меняется) или частота сигнала велика, (~100 кГц), даже при большом сопротивлении измерительного прибора и его небольшой емкости, исследуемый сигнал может значительно искажаться, а его амплитуда упасть в разы.

В таких случаях полезен повторитель напряжения на полевом транзисторе, который обладает большим входным (10-100 МОм) и малым выходным (~100 Ом) сопротивлением, а также малой емкостью [12]. Эквивалентная схема такого повторителя приведена ниже.

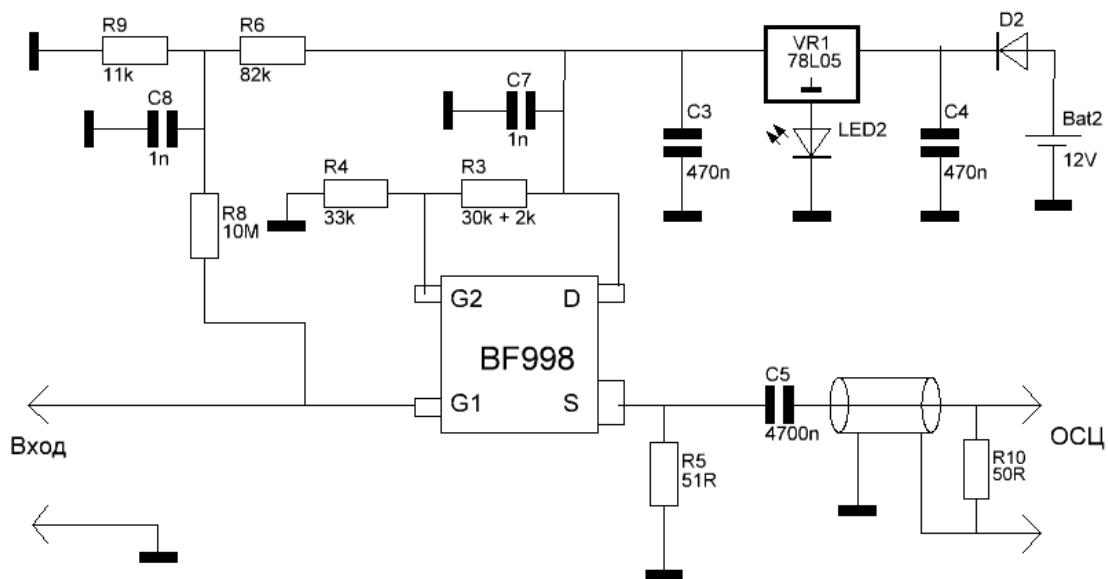


Рис. 7. Принципиальная схема: истоковый повторитель на основе полевого транзистора BF998

Схема является переработкой схемы активного щупа для проверки гетеродина радиоприемника [13].

Сигнал, поступающий на вход, приоткрывает транзистор, и через резистор (сопротивление которого мало по сравнению с сопротивлением источника сигнала) R5 начинает протекать ток I_{DS} , в результате чего на нем

увеличивается падение напряжения U_5 . Переменную составляющую этого напряжения можно зарегистрировать с помощью осциллографа, подключившись к резистору R_5 через конденсатор C_5 и коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. Для исключения искажения сигнала кабель согласован по входу и выходу сопротивлениями R_5 и R_{10} . Измерение по такой схеме позволит избежать значительных искажений сигнала и исследовать источники высокочастотных сигналов с высоким сопротивлением.

Плата, реализующая данный истоковый повторитель, была разведена для установки в небольшой корпус 40x24x18мм (прил. 3)

В процессе использования повторителя было установлено, что он работает неправильно. Его коэффициент усиления оказался значительно меньше единицы ($\sim 1/5$), что можно видеть на осциллограмме ниже.

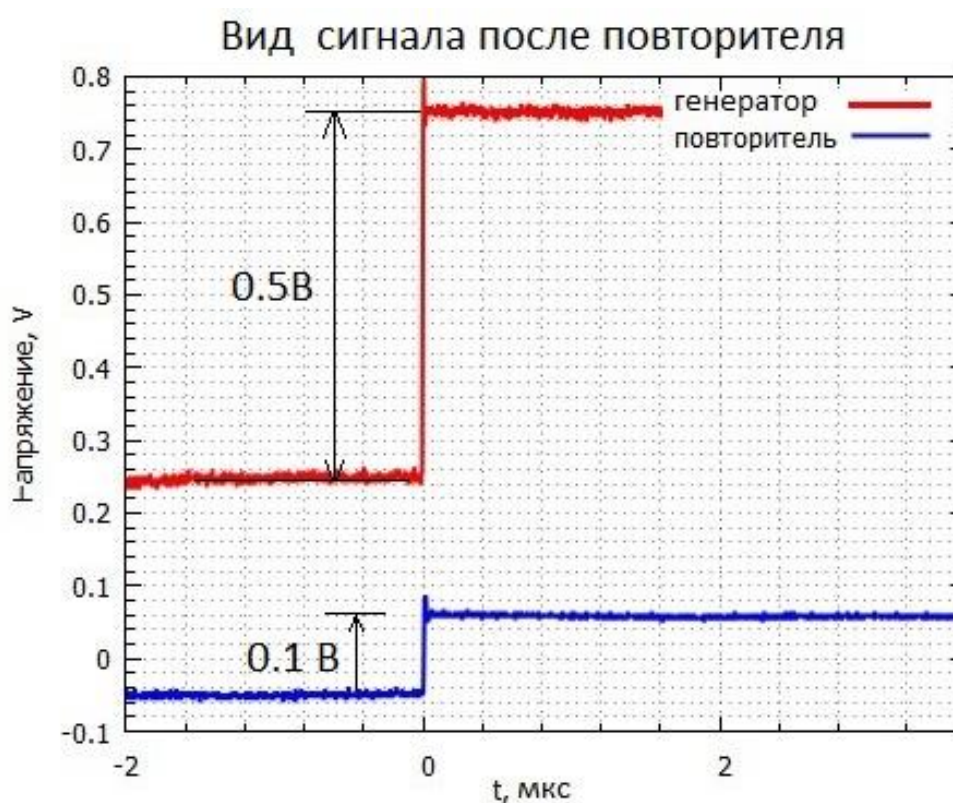


Рис. 8. Осциллограмма пробного входного сигнала амплитудой 0.5 В и выходного сигнала повторителя напряжения.

Коэффициент усиления для повторителя на полевом транзисторе равен [14]:

$$K = \frac{R_M g}{1 + R_M g}$$

где R_M – сопротивление нагрузочного резистора, $R_5 = 51 \text{ Ом}$ на рис.7, g – крутизна транзистора. Как видно, при $R_M \gg \frac{1}{g}$ коэффициент усиления близок к единице, что и требуется для повторителя. Однако у BF998 крутизна довольно мала ($g = 20 \text{ мСм}$; $\frac{1}{g} = 50 \text{ Ом}$). Поэтому условие $R_M \gg \frac{1}{g}$ не выполняется. Увеличить же сопротивление R_5 нельзя, поскольку оно должно быть согласовано с волновым сопротивлением коаксиального кабеля.

Для устранения этой проблемы была предложена модификация схемы, приведенная ниже. Идея заключается в том, чтобы подключить дополнительный ток через транзистор T1 так, чтобы изменение падения напряжения на резисторе R_5 стало равно изменению напряжения на входе.

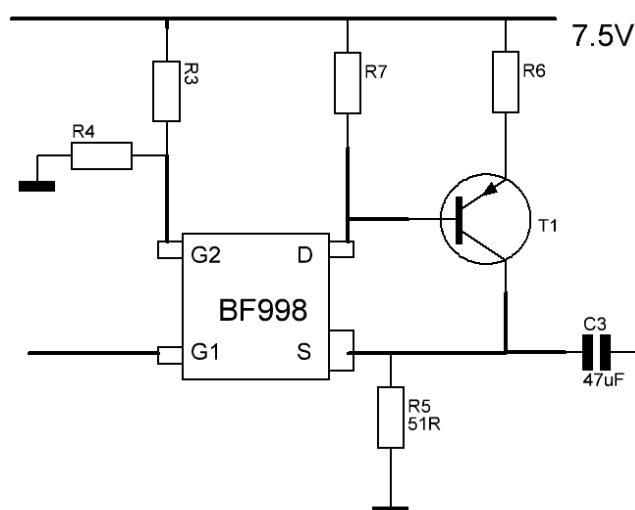


Рис. 9. Модификация схемы истокового повторителя напряжения (рис.7) на основе BF998.

Проверка этой идеи осталась вопросом будущего.

Заключение

В результате работы:

- Была разработана и изготовлена плата для осуществления измерений тока с датчиком LEM LA-55-P, с ее помощью зарегистрированы пульсации в выходном токе источника питания CO2 лазера мощностью 5 кВт.
- Разработана плата для измерения напряжения с датчиком LEM LV-25-P в трехканальном режиме.

- Разработана плата истокового повторителя напряжения на основе транзистора BF998, найдена ошибка в его конструкции, предложена идея ее исправления.

- В целом были продемонстрированы примеры использования гальванических развязок для исследования сигналов и измерения тока и напряжения.

Список литературы

[1] Стерзик К., Голубев И. Надежность и устойчивость гальванической развязки цифровых сигналов // Компоненты и Технологии. 2007. №67

[2] <https://studme.org/83166/tovarovedenie/optopary>

[3] <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrotehnika/galvanicheskaia-izoliatsiia/>

[4] Изолированные датчики тока и напряжения производства ООО «ТВЕЛЕМ»
Характеристики - Применение – Расчеты. - 26 с.

[5][8][12][14] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2 т. Т. I. 3-е изд. – М.: МИР, 1986. – 598 с.

[6] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество - 4-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.

[7] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf

[9] <http://www.farnell.com/datasheets/2283910.pdf>

[10] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf

[11] <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/16256/PHILIPS/BF998/244/1/BF998.html>

[13] <http://www.payatel.ru/604-shema-aktivnogo-vch-schupa-nastroyki-priemnikov.html>