

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Райзвих Артур Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Уменьшение пульсаций тока разряда CO<sub>2</sub> лазера с  
выходной мощностью 5 кВт**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

Ю. И. Красников

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

А. В. Сорокин

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы является увеличение выходной мощности лазера и увеличение бездугового режима его работы посредством уменьшения пульсаций тока разряда. Для этого проведен выбор помехоподавляющих фильтров и подбор значений элементов с использованием программы симуляции электрических цепей NL4. Из полученных данных установлен необходимый вид схемы цепи питания и осуществлена его экспериментальная проверка, из которой замечено снижение пульсаций тока в четыре раза до величины  $\pm 0,25$  А при токе разряда 20 А. В результате проведенной работы удалось значительно повысить устойчивость разряда и увеличить мощность лазера с 3,5 кВт до 5 кВт.

Ключевые слова: пульсации тока, LC-фильтр нижних частот, режекторный LC-фильтр, CO<sub>2</sub>-лазер.

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Теоретическая часть.....	5
2.1 Пульсации тока.....	5
2.2 Уменьшение пульсаций тока. Сглаживающие фильтры.....	5
3. Экспериментальная часть .....	8
3.1 Процесс проведения эксперимента .....	8
3.2 Особенности определения параметров цепи питания.....	10
3.3 Расчет параметров цепи питания.....	11
4. Результаты эксперимента и анализ данных .....	13
Выводы .....	17
Список Литературы.....	18

## 1. Введение

Одними из представителей газовых лазеров считаются лазеры на основе молекул диоксида углерода. КПД таких лазеров достигает 10%. Область применения CO<sub>2</sub>-лазеров довольно широка и включает в себя приборостроение, химию, медицину, геолокацию и др.

Для проведения экспериментальных исследований в лаборатории мощных лазеров применяется тип CO<sub>2</sub>-лазеров, использующий газовый разряд постоянного тока. Питание лазера постоянным током сопровождается появлением нежелательных пульсаций, влияющих на образование электрических дуг. Вследствие того, что появление дугового разряда влечет нарушение работы лазера и его отключение, важно проведение работы по уменьшению частоты их появления. Это достигается за счет уменьшения пульсаций тока разряда.

Пульсации тока – это процесс периодического или случайного изменения постоянного тока относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника питания. Согласно данному утверждению, общий ток в цепи можно рассматривать как сумму переменной и постоянной составляющей. Соответственно именно переменная часть тока мешает нормальной работе установки, приводя к формированию электрических дуг.

Целью данной работы является уменьшение величины пульсации тока разряда и их влияния на выходную мощность CO<sub>2</sub> лазера.

В ходе рассуждений принято, что в основе достижения данной цели лежат два принципа: эффективность и экономичность применяемых способов подавления пульсации. Следовательно, наиболее подходящим вариантом является использование полосно-заграждающего фильтра и фильтра нижних частот для подавления соответствующих гармоник тока пульсаций.

В результате поставлены следующие задачи:

- изучить процессы, происходящие в цепи питания газового разряда лазера;

- определить параметры дополнительной электрической цепи, а именно величины сопротивления, емкости и индуктивности;
- модернизировать источник питания лазера с целью получить максимально возможную мощность лазера без перехода газового тлеющего разряда в дуговой режим.

## **2. Теоретическая часть**

### **2.1 Пульсации тока**

Входной ток от источника питания, который используется в данной работе, можно представить как сумму двух компонент: постоянной составляющей, меняющейся в зависимости от нагрузки, и переменной составляющей – ток пульсаций.

Пульсации представляются в качестве составного сигнала, являющегося суммой гармоник некоторой основной частоты. Обычно этой частотой является частота сети переменного тока или генератора [1-2].

Основная проблема пульсаций заключается в создании помех, влияющих на функционирование других частей общей схемы из-за наличия паразитных индуктивной и емкостной связи в проводниках и разъемах.

Однако в данной работе пульсации являются причиной перехода тлеющего разряда в дуговой разряд. Это приводит к отключению блока питания лазера и его повторному включению. Вследствие чего мощность лазера существенно снижается, что приводит к нарушению технологического процесса.

### **2.2 Уменьшение пульсаций тока. Сглаживающие фильтры**

Влияние пульсаций может быть уменьшено путем подавления ненужных гармоник. Это становится возможным при использовании электрических фильтров – устройств, которые подавляют определенные гармоники сигнала.

Наибольшую известность в электротехнике получили несколько видов фильтров, отличающихся формой фазочастотной (ФЧХ) и амплитудно-частотной (АЧХ) характеристик. Вследствие того, что в данной работе

поставлены задачи по уменьшению пульсаций тока большой мощности (10 – 25 кВт), то наиболее подробно рассмотрим фильтр нижних частот и режекторный фильтр.

Фильтром нижних частот называют устройство, пропускающее низкочастотные гармоники сигнала и подавляющее высокочастотные гармоники.

Режекторный фильтр представляет собой комбинацию фильтров верхних и нижних частот, которая заглушает сигналы вблизи резонансной частоты, и пропускает сигналы вне этого диапазона [2, 3, 4].

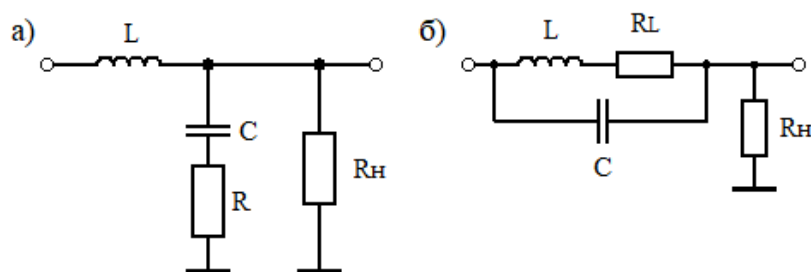


Рис. 1. Примеры общих схем электрических фильтров: а) фильтра нижних частот и б) режекторного фильтра.

Исходя из решения двух разных задач конструкция и выбор решения для этих фильтров не однозначен. Из-за чего следует определить основные характеристики фильтров и установить особенность их работы.

Используя комплексное представление сопротивлений, рассмотрим фильтр нижних частот и режекторный фильтр на примере схем, показанных на рис. 1.

Для анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) четырехполюсников в качестве фильтров используется характеристика, называемая передаточной функцией. Коэффициент передачи описывает пропускную способность фильтра.

Коэффициент передачи фильтра нижних частот (рис. 1. а) равен

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_C + R}{R + Z_C + Z_L} = \frac{(j\omega C)^{-1} + R}{R + (j\omega C)^{-1} + j\omega L} = \frac{1 + (\omega RC)^2 - \omega^2 LC}{R^2 + (L\omega - (\omega C)^{-1})} + \frac{j\omega RL}{R^2 + (L\omega - (\omega C)^{-1})}$$

Модуль коэффициента передачи цепи составляет

$$|K| = \frac{\sqrt{(\omega C)^{-2} + R^2}}{\sqrt{(L\omega - (\omega C)^{-1})^2 + R^2}} \quad (1)$$

Без дополнительного сопротивления выражение можно преобразовать к следующему виду

$$|K| = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} = \frac{(j\omega C)^{-1}}{(j\omega C)^{-1} + j\omega L} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$$

Аналогично рассмотрим режекторный фильтр на примере схемы, изображенной на рис. 2, б. Так как особенность полосно-заграждающего фильтра состоит в достижении максимальной величины сопротивления при резонансной частоте контура, то необходимо выразить данную частоту через параметры фильтра.

Импеданс LC-контура равен:

$$Z = \frac{Z_C(Z_L + R_L)}{Z_C + Z_L + R_L} = \frac{(j\omega C)^{-1}(j\omega L + R_L)}{(j\omega C)^{-1} + j\omega L + R_L} = \frac{j(jR_L(\omega C)^{-1} - LC^{-1})(\omega C)^{-1} - \omega L + R}{R_L^2 + (\omega L - (\omega C)^{-1})^2},$$

где  $R_L$  - активное сопротивление дросселя.

Резонансную частоту данного контура можно получить при равенстве реактивных сопротивлений

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1 Процесс проведения эксперимента

В ходе работы исследуется способ подавления пульсаций тока с помощью электрических фильтров. Для проведения экспериментов используется штатный источник питания разряда, выполненный на основе трёхфазного повышающего трансформатора, выпрямительного диодного моста Ларионова и токогладящего дросселя с большой индуктивностью (481 мГн). Регулировка тока осуществляется по первичной сети с помощью тиристорной фазовой отсечки. Выходной ток может достигать 25 А при напряжении до 1,5 кВ.



Рис. 2. Фотографии а) установки во время эксперимента и после монтажа оборудования в корпус источника питания б) нижнего катода (первый канал) и в) верхнего катода (второй канал).

Лазер содержит два разрядных промежутка, имеющих общий анод в виде пластины и отдельных катодов в виде медных трубок с охлаждающей жидкостью внутри (вода). Дополнительно необходимо отметить наличие взаимного влияния цепей питания нижнего и верхнего катода друг на друга, так как они являются частью общего процесса формирования разряда. Вследствие этого становится невозможным полностью исключить взаимное влияние двух источников питания на индивидуальные процессы.



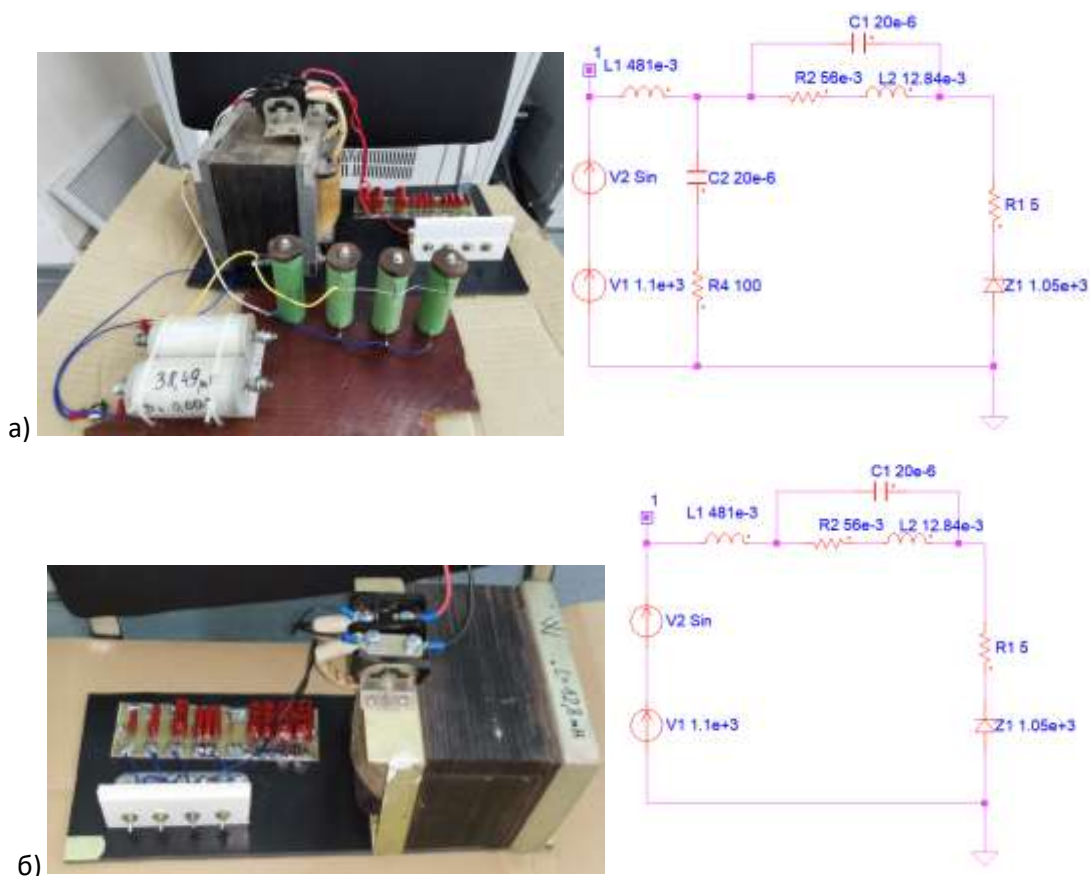


Рис. 3. Фотографии прототипов фильтров, подключенных к а) первому каналу и б) второму каналу.

Процесс проведения эксперимента включает в себя несколько этапов: расчет параметров фильтров на основе существующих компонентов электрической цепи, теоретическое моделирование схем фильтров, создание реальных прототипов, практическая проверка цепи питания, сравнение с исходным сигналом первого и второго канала, обработка результатов.

Наблюдение за показаниями тока производится при использовании двух схем питания (рис. 3), дополненных LC-фильтром нижних частот и полосно-заграждающим фильтром LC-фильтром. Параллельно дросселю с индуктивностью 12,84 мГн подсоединен конденсатор, перестраиваемый в диапазоне (17 – 24,5) мкФ с шагом 0,5 мкФ для подстройки по минимальной частоте пульсаций тока (рис. 3. а, б). В первом приближении значение емкости данного конденсатора составляет порядка 20 мкФ.

Измерения включают в себя следующую последовательность действий. Датчики тока, встроенные в корпус источников питания, подключаются к

осциллографу, затем после включения источников питания разряда производится замеры и сравнения показаний контрольного источника питания и испытуемого источника питания при трех видах его модификации: режекторный LC-фильтр; комбинация LC-фильтра и LC-фильтра нижних частот; подключение дополнительного к имеющимся фильтрам сопротивления 10 Ом последовательно с нагрузкой.

Перед каждой модификацией испытуемой схемы происходит отключение источника питания. Затем производится замена элементов цепи и переподключение.

### **3.2 Особенности определения параметров цепи питания**

Расчет параметров электрических фильтров происходит с помощью численного моделирования в программе NL4 (разработка ИЯФ СО РАН) на основе имеющихся данных об источнике питания источнике питания СО2 лазера и доступных в использовании компонентах электрической цепи.

Перед определением параметров необходимо обосновать использование двух разных фильтров в испытуемой схеме и определить представление лазера в виде компонентов электрической цепи.

Так, одновременное использование двух типов фильтров обусловлено тем, что режекторный LC-фильтр подавляет основную гармонику пульсаций тока (300 Гц), а LC-фильтр нижних частот подавляет высокие гармоники и ограничивает дополнительный бросок тока при переходе тлеющего разряда в дугу. Собственно тлеющий разряд представлен на электрической схеме как стабилитрон с напряжением стабилизации 1,05 кВ и динамическим сопротивлением 5 Ом. Данный выбор динамического сопротивления стабилитрона обусловлен оценкой реальных значений сопротивлений при заданных значениях тока разряда.

### 3.3 Расчет параметров цепи питания

Рассмотрим последовательно элементы режекторного фильтра и фильтра нижних частот.

Для определения величины емкости конденсатора в режекторном LC-фильтре используется явление резонанса на частоте 300 Гц при индуктивности дросселя 12,84 мГн (используется дроссель от старого блока питания лазера с ламповой накачкой). Согласно формуле (2) емкость конденсатора составила 21,91 мкФ. Значение данного порядка подбиралось на схеме в прототипе режекторного LC-фильтра с помощью параллельно установленных конденсаторов номиналом 0,5, 1, 2, 4, 17 мкФ, позволяющих переключением тумблеров провести точную настройку емкости по критерию минимальных пульсаций тока разряда.

Выбор величины сопротивления резистора 100 Ом в фильтре нижних частот обусловлен следующим фактором. При параллельном соединении конденсатора фильтра с нагрузкой на его обкладках будет формироваться разность потенциалов порядка величины напряжения горения разряда, что в приближении составляет 1 кВ. Вследствие этого в момент появления электрической дуги происходит разрядка конденсатора, и появляется дополнительный ток поддерживающий разряд в газе. Для того, чтобы снизить влияние добавочного тока, последовательно с конденсатором установлен резистор ранее утвержденного номинала.

Значение емкости конденсатора в фильтре нижних частот определено согласно двум условиям. Порядок величины емкости должен соответствовать порядку емкости конденсатора, находящегося в LC-контуре. При данном утверждении величина дополнительного тока, протекающего через обе емкости, уменьшается в два раза. Вторым условием становится то, что при токе порядка 20 А, протекающем через дроссель с индуктивностью 481 мГн, энергия конденсатора, заряженного до 1 кВ, должна быть на порядок меньше энергии, запасённой в дросселе. Следовательно, энергия конденсатора должна быть

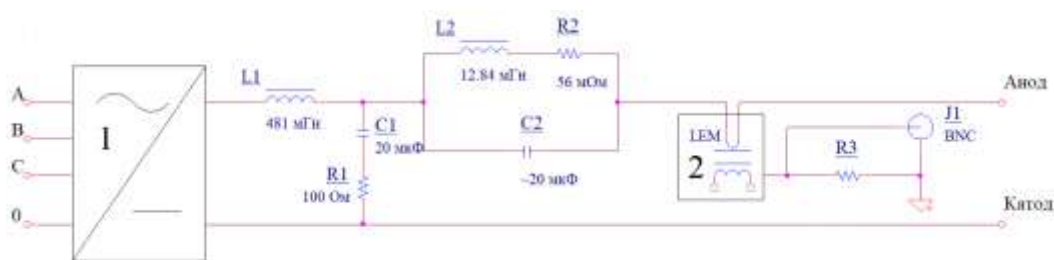


Рис. 4. Схема испытуемого источника питания:  
1 - источник питания СО2 лазера, 2 – датчик тока LEM.

меньше 24 Дж, а значит емкость должна быть меньше 50 мкФ. Результатом проведенного анализа становится выбор емкости величины 20 мкФ.

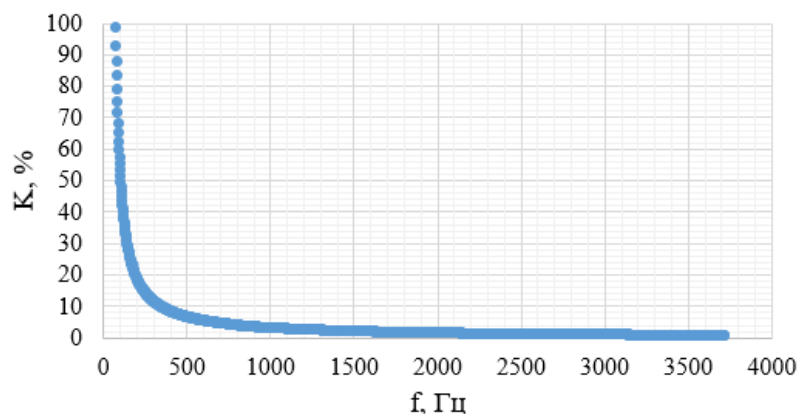
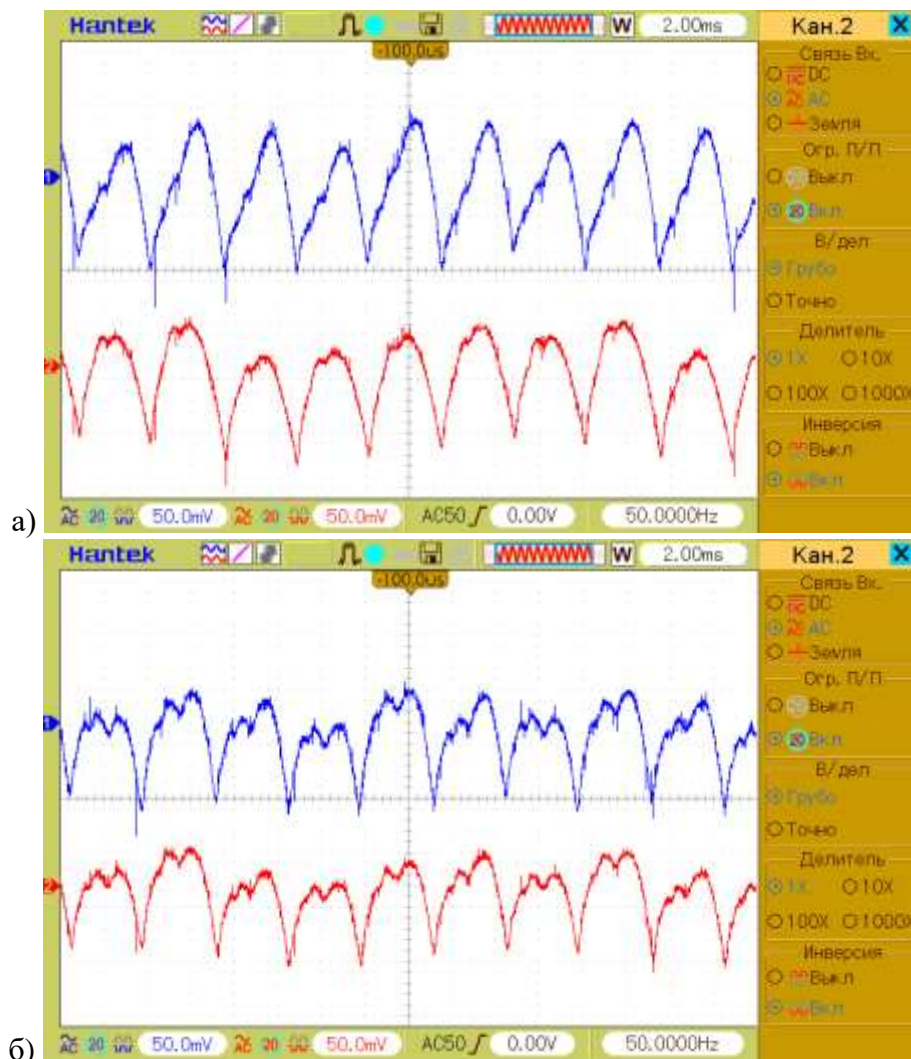


Рис. 5. График зависимости коэффициента пропускания LC-фильтра нижних частот от частоты гармоник пульсаций тока

График коэффициента пропускания LC-фильтра нижних частот получен согласно выражению (1) (рис. 5).

#### 4. Результаты эксперимента и анализ данных

В результате проведенного эксперимента получены фотографии осциллограмм силы тока, образованной контрольным и испытуемым источниками питания. Электрические схемы, используемые в испытуемой цепи питания, представлены вместе с фотографиями осциллограмм (рис. 6-7).



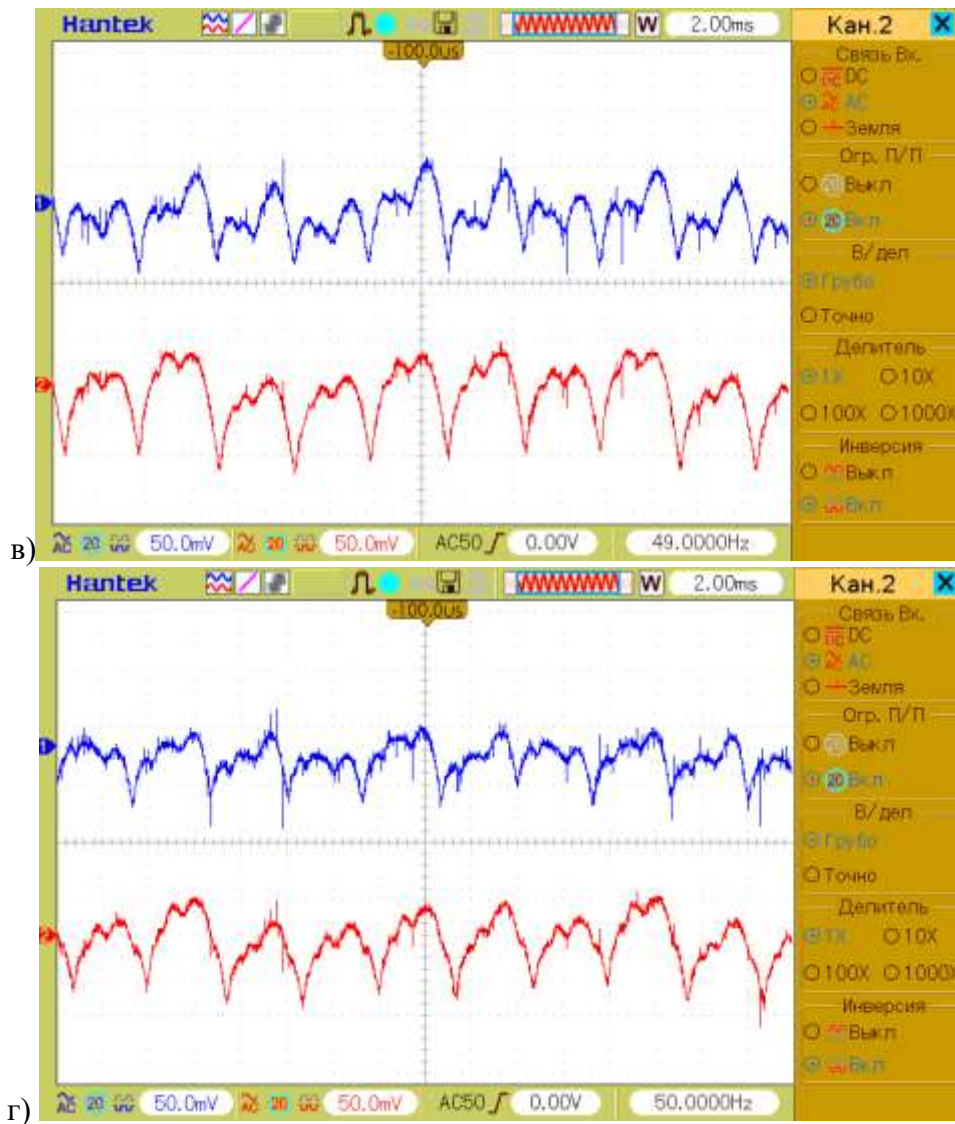


Рис. 6. Осциллограммы тока при различных составляющих цепи питания нижнего катода:

- а) испытываемая схема не имеет дополнительных сопротивлений и фильтров;
- б) подключение режекторного LC-фильтра;
- в) подключение LC-фильтра нижних частот и режекторного LC-фильтра;
- г) подключение дополнительного сопротивления.

Синий сигнал представляет ток, протекающий в испытываемой схеме источника питания, красный – ток в контрольной схеме.

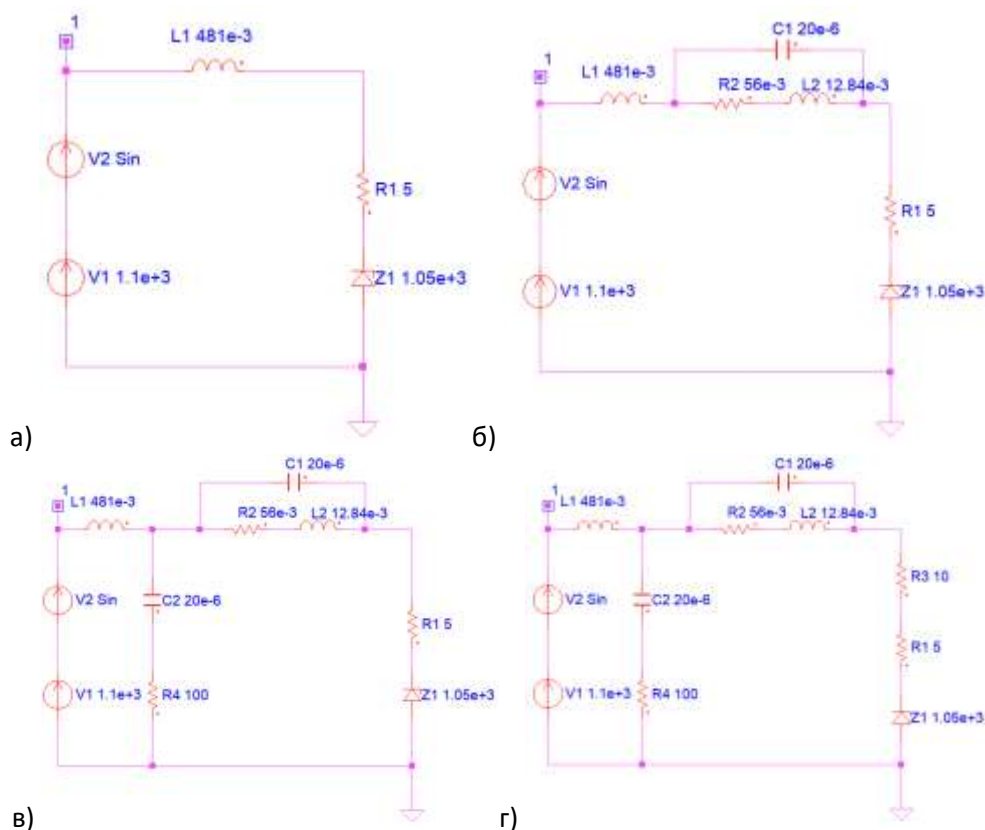


Рис. 7. Схемы источника питания нижнего катода при различных модификациях:

- а) испытуемый стенд не имеет дополнительных сопротивлений и фильтров;
- б) подключение режекторного LC-фильтра;
- в) подключение LC-фильтра нижних частот и режекторного LC-фильтра;
- г) подключение дополнительного сопротивления.

Проведя сравнение сигналов схем, установлены существенные различия в показаниях силы тока на каждом шаге изменения испытуемой схемы.

Нетрудно заметить, что в отсутствии дополнительных электрических фильтров явление пульсаций тока наблюдается в явном виде (рис. 6. а). Это подтверждается резким периодическим изменением знака производной на участках осциллограммы. Именно данный эффект важно свести к минимуму, чтобы увеличить мощность лазера, используемого в работе.

В дальнейшем, при модификации испытуемой схемы наблюдается сглаживание силы тока (рис. 6. б-г).

Так, при подключении режекторного LC-фильтра замечен спад амплитуды тока. Данное явление характеризуется глушением основной гармоники

пульсаций. Затем после добавления LC-фильтра нижних частот происходит общее снижение пульсаций за счет подавления гармоник высоких частот.

В последнем случае при установке дополнительного сопротивления совершается сглаживание всего тока пульсаций. Дополнительно отмечено изменение величины фазы тока при сравнении сигналов с контрольной и испытуемой схемы. Вследствие чего суммарный коэффициент усиления в лазере становится не так сильно модулирован, что может быть полезным при необходимости большего снижения амплитуды пульсаций тока разряда.

В завершение анализа осциллограмм стоит отметить, что уже после проведения эксперимента, проведения монтажа оборудования и настройки схем питания удалось добиться подавления пульсаций тока до величины  $\pm 0,25$  А (рис. 8) при изначальном значении  $\pm 1$  А. Этого оказалось более чем достаточно, чтобы устранить появление электрической дуги и поднять среднюю выходную мощность лазера с 3,5 кВт до 5 кВт.



Рис. 8. Осциллограммы тока, возникающего в двух каналах источника питания при максимальном подавлении пульсаций тока разряда.



## **Выводы**

В ходе работы определен наиболее предпочтительный способ подавления пульсаций тока разряда, основанный на использовании LC-фильтра нижних частот и полосно-заграждающего LC-фильтра. Рассчитаны параметры фильтров и цепи питания, позволяющих получить максимальное снижение пульсаций тока. Осуществлено моделирование процессов, происходящих в схеме, с использованием программы симуляции NL4.

Результатом вычислений и подбора реальных электронных компонентов стала установка элементов фильтров следующего номинала: дросселя с индуктивностью 12,84 мГн, рабочим током 30 А и активным сопротивлением 56 мОм; конденсаторов с емкостями порядка 20 мкФ; резистора с сопротивлением 100 Ом.

Проведены сборка источника питания и экспериментальная проверка схемы на эффективность подавления пульсаций тока разряда. С помощью датчиков тока, находящихся в двух каналах источника питания, зафиксированы соответствующие осциллограммы.

Выполнен анализ осциллограмм, согласно которому установлено снижение пульсаций тока до величины  $\pm 0,25$  А при токе цепи питания 20 А, что означает уменьшение пульсаций тока разряда в 4 раза по сравнению с пульсациями до модификации. В результате за время 10-часового использования лазера не наблюдается появления электрических дуг, что говорит об улучшении устойчивости разряда и увеличении времени непрерывной работы СО<sub>2</sub>-лазера.

Данные факты привели к увеличению мощности лазера с 3,5 кВт до 5 кВт.

При необходимости еще большего устранения пульсаций тока в построенную схему возможно добавить дополнительные активные и реактивные сопротивления для сглаживания пиков в осциллограмме. Однако данный вопрос уже можно считать дополнительной задачей.

## **Список Литературы**

1. ГОСТ Р. 52002-2003 Электротехника. Качество электрической энергии. Термины и определения //Госстандарт России.-Москва. – 2003.
2. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. – Лань, 2010.
3. Жеребцов И. П. Электрические и магнитные цепи: основы электротехники. – Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.
4. Райдер Д. Техническая электроника. – 1961.