

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Стуколов Илья Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**ПИД-регуляторы в системах с обратной связью для управления
параметрами лазерного излучения**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20303

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. И.И. Бетеров
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. В.В. Максимов
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью работы являлось определение оптимальных параметров PID-регуляторов для флуктуаций частоты лазерного излучения в системах с обратной связью. Для проведения исследования использовалась экспериментальная установка с титан-сапфировым лазером.

Были проведены экспериментальные испытания с различными методами получения сигналов ошибки и подбором коэффициентов усиления в системе обратной связи. Основным результатом работы состоит в стабилизации частоты лазерного излучения, на которую не влияют внешние воздействия (в первую очередь, акустические шумы и тепловые дрейфы элементов резонатора лазера), а также оценка ширины линии лазера. Для стабилизации частоты использовался метод Паунда-Драйвера-Холла и метод привязки на склон пропускания. По измеренному сигналу ошибки была определена ширина линии лазерного излучения.

Благодаря стабилизации частоты лазерного излучения были проведены эксперименты по изучению лазерного возбуждения холодных атомов рубидия.

Ключевые слова: PID-регулятор, система с обратной связью, пьезо-электрический эффект, сапфировый лазер, метод Паунд-Драйвера-Холла, метод привязки на склон пропускания.

Содержание

Введение	3
Теоретическая часть	4
<i>PID-регулирование</i>	4
<i>Общие подходы к стабилизации частоты лазерного излучения</i>	6
Описание экспериментальной установки и методика измерения.....	8
Выводы.....	15
Благодарности	16
Список литературы.....	17

Введение

Системы с обратной связью широко используются во многих отраслях науки, так как существует необходимость оптимизации внешних условий, например, в робототехнике или автоматизации экспериментов.

Целью работы являлось изучение различных способов генерации сигнала ошибки и определение оптимальных параметров PID-регуляторов для компенсации внешних воздействий на лазерное излучение путем использования отрицательной обратной связи.

Основные задачи:

- 1) Изучить принцип функционирования систем с обратной связью и PID регуляторов.
- 2) Изучить методы стабилизации частоты лазерного излучения с использованием внешних реперов частоты и управления частотой лазерного излучения с использованием пьезоэлектрического эффекта.
- 3) Оптимизировать параметры PID регулятора для стабилизации частоты лазера.
- 4) Оценить ширину линии лазера.

Теоретическая часть

ПИД-регулирование

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – устройство, используемое в системах с обратной связью для обработки сигнала ошибки. Системы обратной связи – системы с возможностью корректировки ошибок в прямом канале связи путем передачи сигналов по обратному каналу. Схематично устройство ПИД регулятора приведено на рис. 1.

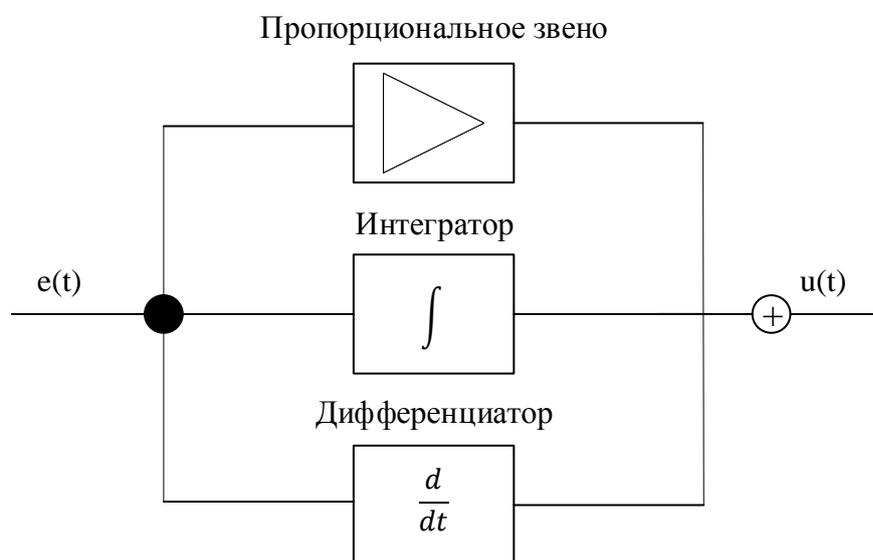


Рис. 1. Схема ПИД – регулятора

Функцию правки сигнала ПИД регулятора можно представить в следующем виде:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1)$$

В формуле (1): $u(t)$ – функция правки, P – пропорциональная составляющая, I – интегральная составляющая, D – дифференциальная составляющая, $e(t)$ – сигнал ошибки, K_p – пропорциональный коэффициент, K_i – интегральный

коэффициент, K_d – дифференциальный коэффициент. Рассмотрим влияние каждого коэффициента.

Пропорциональная составляющая вычисляется из разности заданной величины параметра и его реального значения. Чем больше отклонение сигнала, тем больше значение пропорционального коэффициента. Влияние на результирующий сигнал оказывает статическая ошибка. Для устранения ее влияния на систему используется интегральная составляющая. При отклонении анализируемого сигнала пропорциональный коэффициент возвращает его к прежнему значению, но, благодаря ошибке, регулируемый сигнал не достигает требуемой величины, интегральная составляющая позволяет получить сигнал без статической ошибки. Однако такая система обладает медленным быстрым действием, накопление и суммирование ошибок приводит к увеличению сигнала ошибки. Для достижения высокого быстрого действия в систему добавляют дифференциальную составляющую, способную изменяться согласно изменению скорости контролируемого сигнала.

Рассмотрим ступенчатый сигнал без включенного PID-регулятора (рис. 2).

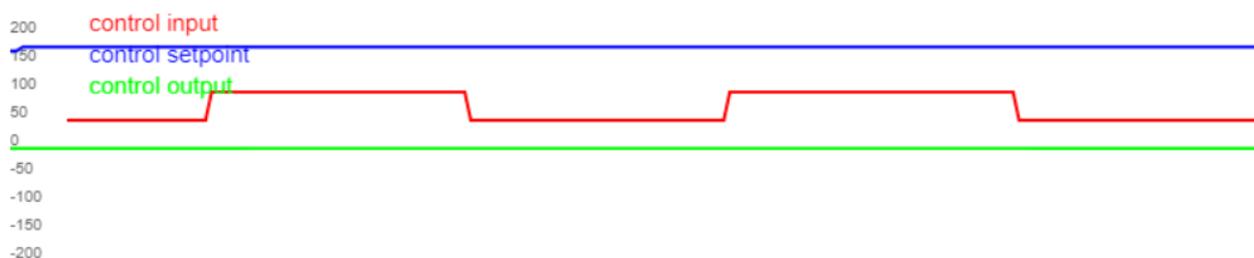


Рис. 2. Ступенчатый сигнал

Так как PID-регулятор выключен, то система не обрабатывает любые возмущения на графике. Постепенно увеличивая K_p получается добиться следующей картины (рис. 3).

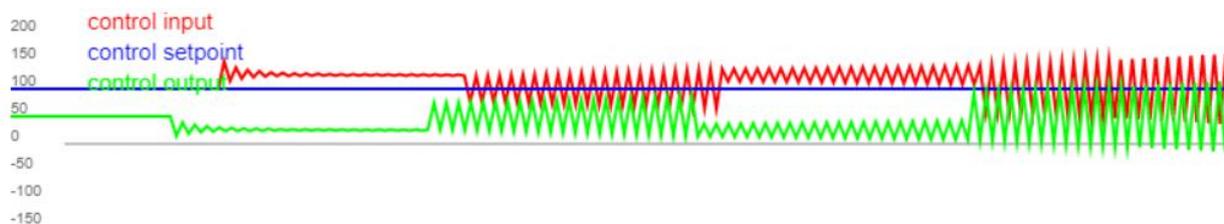


Рис. 3. Ступенчатый сигнал с включенной K_p составляющей регулятора

Вначале система обрабатывает ошибку корректно, уменьшая влияние резкого изменения сигнала, но, из-за накопления статической ошибки, сигнал переходит в состояние возбуждения. Дальнейшая часть графика показывает некорректную работу PID-регулятора и проблему использования только пропорциональной составляющей прибора.

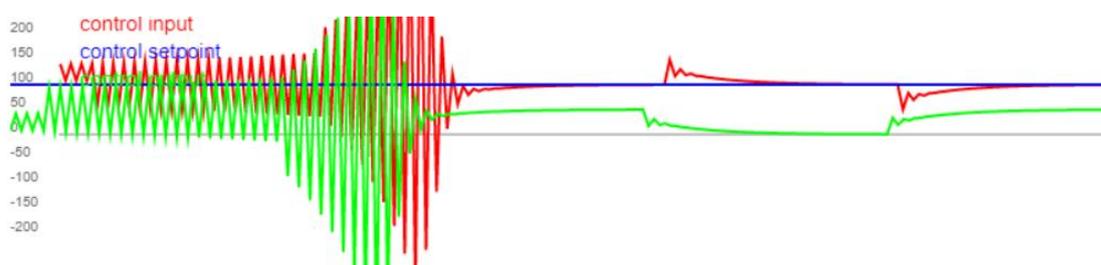


Рис. 4. Ступенчатый сигнал с включенной K_p и K_i составляющих регулятора

На рис. 4 показан пример корректной работы рассматриваемой системы после включения интегральной составляющей, которая позволяет исключить накопление статической ошибки.

Общие подходы к стабилизации частоты лазерного излучения

Существуют различные методы, благодаря которым можно добиться стабильной частоты лазерного излучения. Все эти методы предусматривают использование реперов частоты, в качестве которых могут рассматриваться интерферометры Фабри-Перо. В данной работе были применены методы

привязки на склон пика пропускания и метод Паунда-Драйвера-Холла. Эти методы позволяют стабилизировать частоту лазера относительно одной из собственных частот оптического резонатора. В состав схемы включен интерферометр Фабри-Перо, главной особенностью которого является комплексная форма зависимости коэффициента отражения от частоты. Это приводит к возникновению фазовых сдвигов для различных спектральных компонент излучения, благодаря чему можно получить сигнал ошибки в методе Паунда-Драйвера-Холла.

Для управления частотой лазерного излучения необходимо регулировать длину резонатора лазера. Для этого элементы резонатора размещаются на пьезокерамических актюаторах, на которые подается высокое напряжение.

Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в возникновении механической деформации пьезокристалла под воздействием внешнего электрического поля. На этом физическом явлении основана работа актюаторов. Зеркала лазера «TIS-SF-777» наклеены на многослойные керамические кольца. Зависимость деформации пьезокристалла от внешнего поля можно записать в матричном виде:

$$S = d_t E + \varepsilon^E T. \quad (2)$$

В формуле (2) S – деформация (безразмерная величина) $(\frac{\Delta L}{L})$, d – пьезоэлектрический модуль, индекс t – знак транспонированной матрицы, E – напряженность электрического поля, ε^E – диэлектрическая проницаемость в условиях постоянного электрического поля, T – механическое давление. В результате этого в электрическом поле толщина пьезокерамики меняется и, следовательно, меняется расстояние между зеркалами лазера и частота лазерного излучения.

Описание экспериментальной установки и методика измерения

Основой установки является TIS-SF-777 – лазер на основе кристалла сапфира, легированного ионами титана, с кольцевым резонатором для получения одночастотного режима. Схема резонатора лазера приведена на рис.5. Зеркало M5 диаметром 5 мм наклеено на однослойную пьезокерамическую подложку, обеспечивающую быструю отработку акустических возмущений. Зеркала M4, M6 и M3 наклеены на многослойные керамические кольца, используемые для компенсации медленных тепловых дрейфов резонатора лазера.

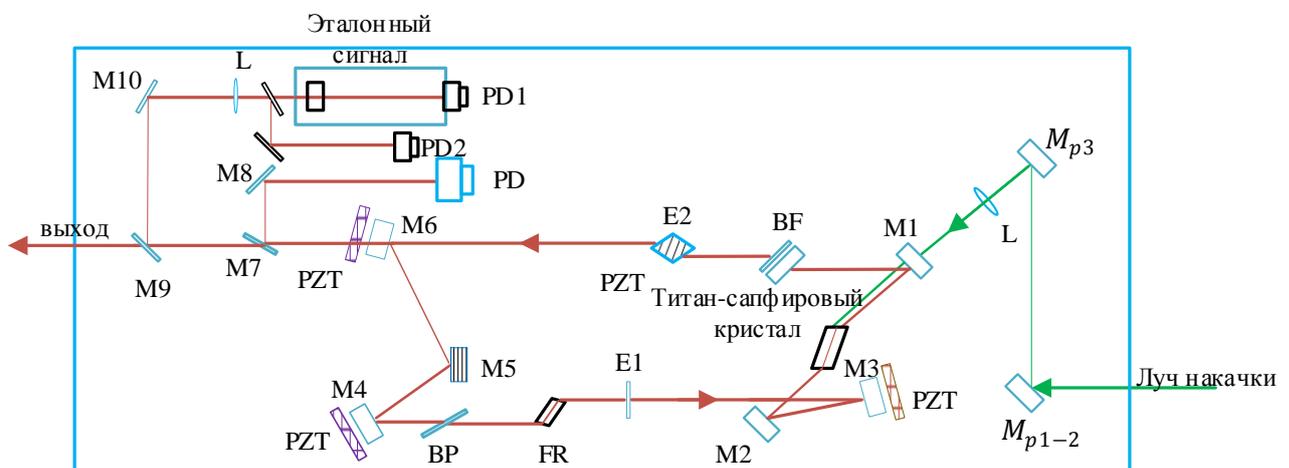


Рис. 5. Схема резонатора одночастотного титан-сапфирового лазера, M_p - зеркало накачки, L – линза, M1 и M2 – сферические зеркала, M3, M4, M5 – плоские зеркала, M6 – плоское выходное зеркало BF – трехпластинчатый лучевой фильтр, E1 – тонкий эталон Фабри-Перо, E2 – толстый эталон Фабри-Перо, FR – вращатель Фарадея, BP – пластина Брюстера, PD – фотоприемник, M7, M8 – вспомогательные зеркала, PZT – пьезокерамика.

В работе использовались два различных способа стабилизации частоты: метод привязки на склон пика и метод Паунд-Драйвера-Холла. Схемы установок изображены на рисунках 6 и 8. Склон пика пропускания интерферометра Фабри-Перо может использоваться в качестве сигнала ошибки. В этом случае

середина склона выбирается в качестве положения равновесия (ноль на выходе системы обратной связи). Для компенсации влияния изменений выходной мощности лазера на положение равновесия используется схема с дифференциальным усилителем, когда измеряется разность интенсивностей лазерных пучков, проходящих через интерферометр или в обход него, как показано на рис.6. Недостаток этой простой схемы – невысокая точность, поскольку привязка происходит не на экстремум. Кроме того, низкодобротный перестраиваемый по частоте интерферометр, использованный в данной установке, не имеет требуемой долговременной стабильности.

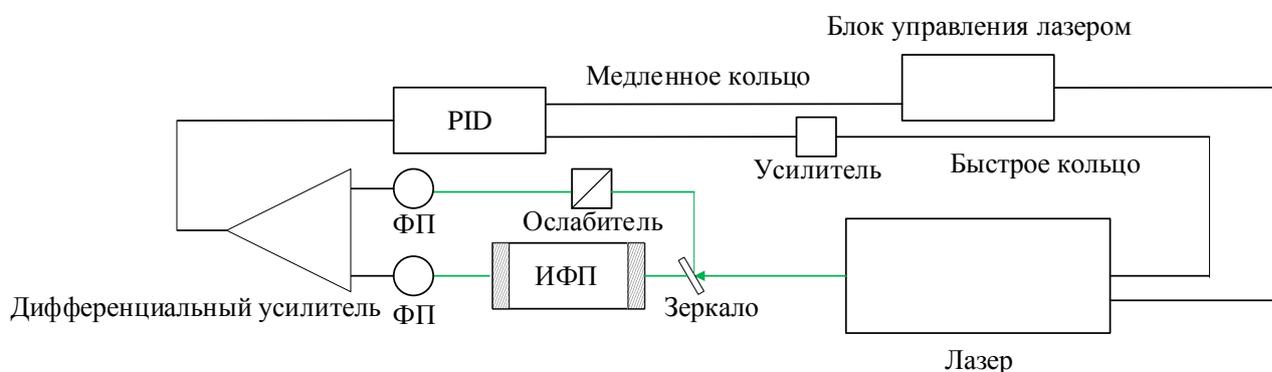


Рис. 6. Схема привязки на склон пика пропускания, ИФП – интерферометр Фабри-Перо, ФП – фотоприемник

На рис. 7 приведен экспериментально измеренный сигнал ошибки для привязки лазера на склон пика пропускания. Ноль сигнала соответствует точкам А и Б, в зависимости от знака коэффициента усиления будет происходить привязка на один или другой склон пика.

Альтернативный подход – метод Паунда-Драйвера-Холла, где используется генерация дополнительных спектральных компонент излучения и их биения при отражении от интерферометра Фабри-Перо. Этот метод технически более сложный, но позволяет использовать высокостабильные

высокодобротные интерферометры Фабри-Перо с очень узкими резонансами пропускания.

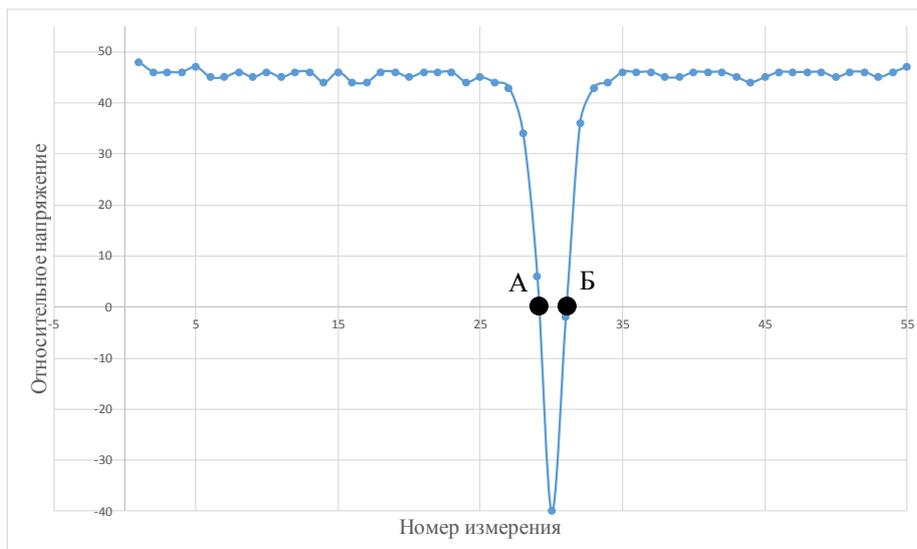


Рис. 7. Иллюстрация для метода привязки на склон пика пропускания

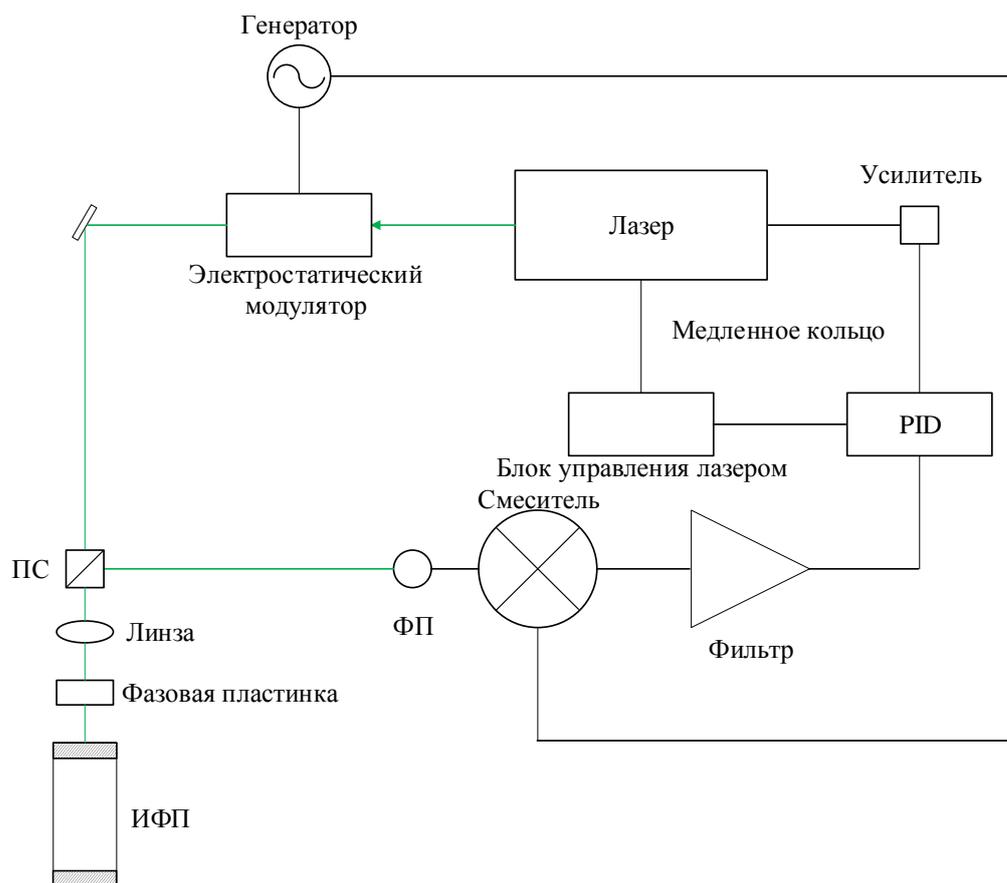


Рис. 8. Схема привязки методом Паунда-Дривера-Холла, ИФП – интерферометр Фабри-Перо, ФП – фотоприемник, ПС – поляризационный светоделитель.

Схема стабилизации приведена на рис.8. Частота лазерного излучения модулируется электрооптическим модулятором. Сигнал биений на фотоприемнике демодулируется на той же частоте. В результате работы схемы сигнал ошибки при сканировании частоты лазера имеет форму, приведенную на рис. 9.

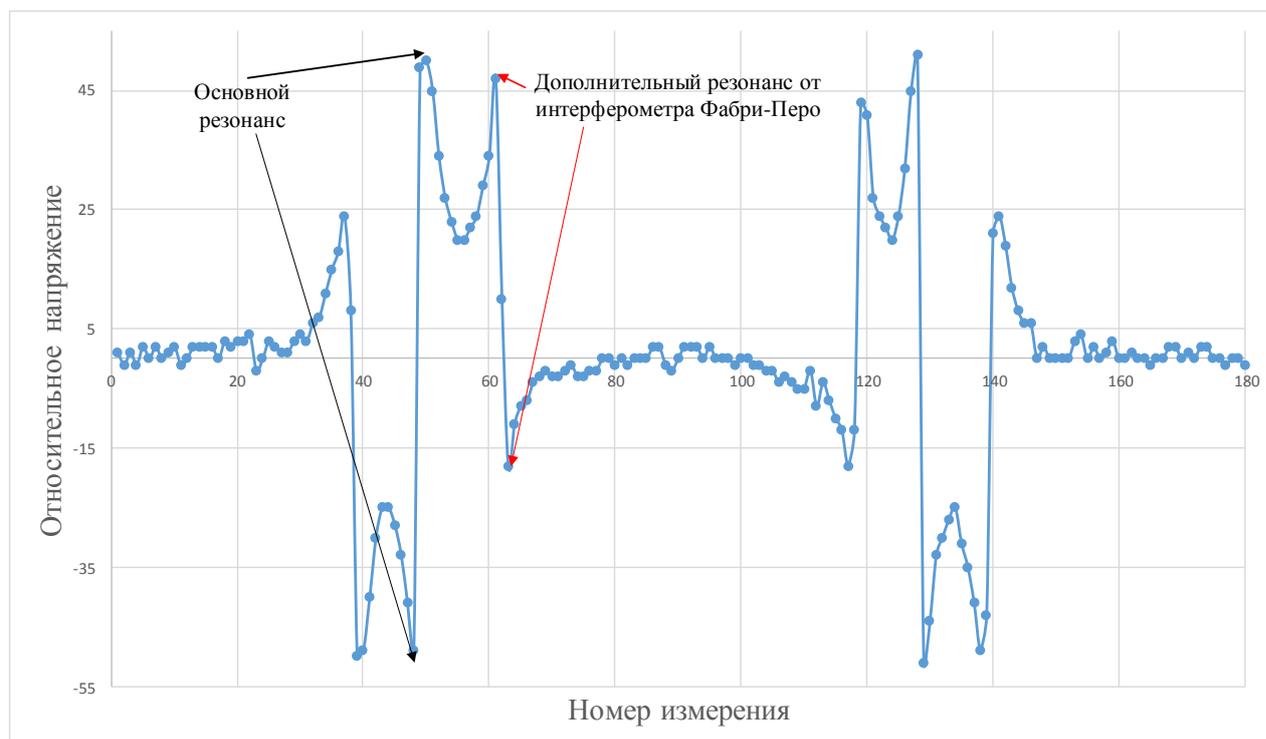


Рис. 9. Вид сигнала, полученный с помощью метода Паунда-Драйвера-Холла.

Крутой склон демодулированного сигнала можно использовать в качестве сигнала ошибки для стабилизации частоты лазера. Кроме того, пересечение сигнала с осью абсцисс происходит не только на частоте пика пропускания интерферометра, но и на частоте спектральных компонент, возникающих в результате модуляции излучения. Это позволяет откалибровать сигнал как функцию частоты излучения.

Процедура стабилизации частоты проведена следующим образом.

Сначала проводилась работа по настройке Медленного кольца (М.К.), подбор параметров блока управления лазера так, чтобы получить сигнал ошибки Паунд-Драйвера-Холла. Затем включалось Быстрое кольцо и происходил подбор общего коэффициента ПИД-регулятора при различных настройках интегратора для получения наименьшей амплитуды сигнала. Дальнейшая настройка заключалась в уменьшении времени интегрирования с дополнительного выхода М.К. Результатом настроек системы стала ее стабильная работа при попытках быстрых изменений частот лазера.

При этом интегрирующий коэффициент на ПИД-регуляторе был выставлен на значение 2 кГц, а дифференцирующий – на минимальное значение. Во втором случае интегрирующая составляющая равнялась 5 кГц, дифференцирующая – минимум.

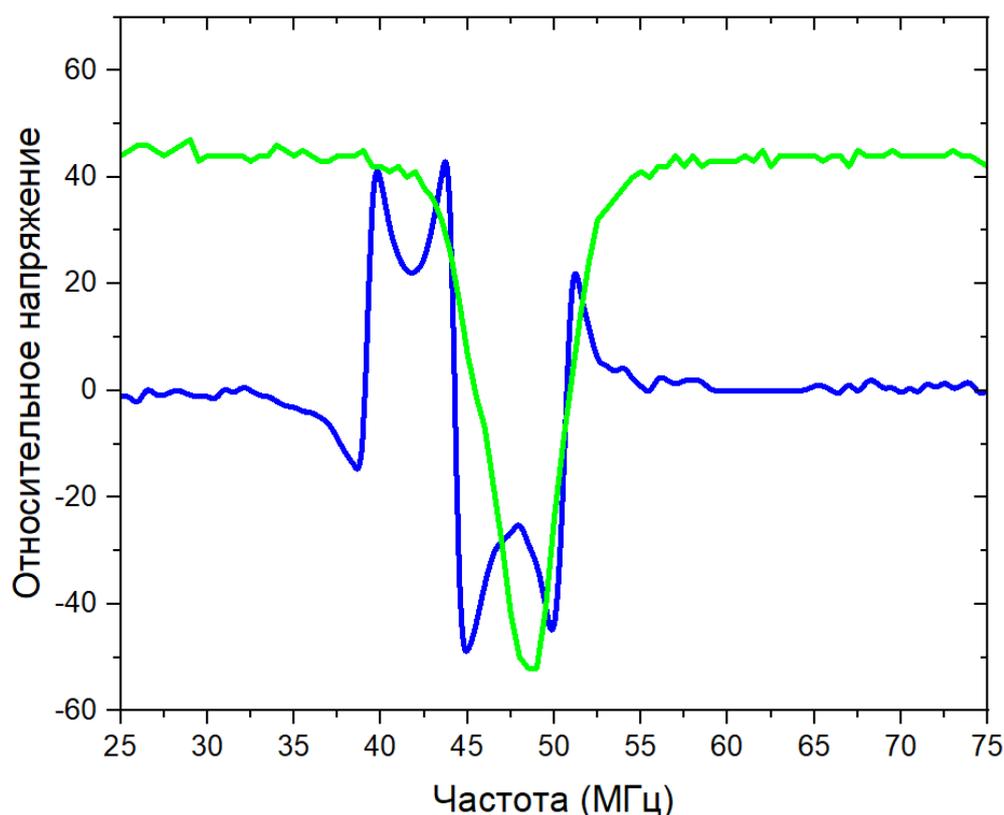


Рис. 10. Сигналы ошибки для разных способов стабилизации частоты. Синий сигнал – метод Паунд-Драйвера-Холла, зеленый – метод привязки на склон пропускания.

С помощью первой установки сигнал стабилизировался по методу привязки на склон пика, во второй – методом Паунд-Драйвера-Холла. Полученные сигналы ошибки изображены на рис. 10.

Первоначальные данные с осциллографа не содержат в себе информацию касательно единиц измерения оси x, однако ее можно восстановить, зная, что расстояния между главным резонансным и дополнительным от интерферометра пиками равны 5 МГц. Ширину линии пропускания можно определить по формуле $\langle \Delta f \rangle = \frac{\langle U \rangle}{\frac{dU}{df}}$. Где $\langle U \rangle$ – среднеквадратичное отклонение напряжения на сигнале после работы PID-регулятора, $\frac{dU}{df}$ – углы наклона привязок. Погрешность ширины линии лазера определялась исходя из погрешности угла наклона пика $\frac{\Delta \frac{dU}{df}}{\frac{dU^2}{df}} \cdot \langle U \rangle$. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения среднеквадратичного отклонения напряжения и углов наклона привязок при разных методах.

	Метод привязки на склон пика	Метод Паунд-Драйвера-Холла
$\langle U \rangle$,	3,57175	3,11773
$\frac{dU}{df}$	$-19,64286 \pm 0,8$	$-19,64286 \pm 0,88$
$\langle \Delta f \rangle$, КГц	$181,835 \pm 8$	$158,721 \pm 7$

Полученные стабильные сигналы стабильной работы лазера представлены на рис. 11.

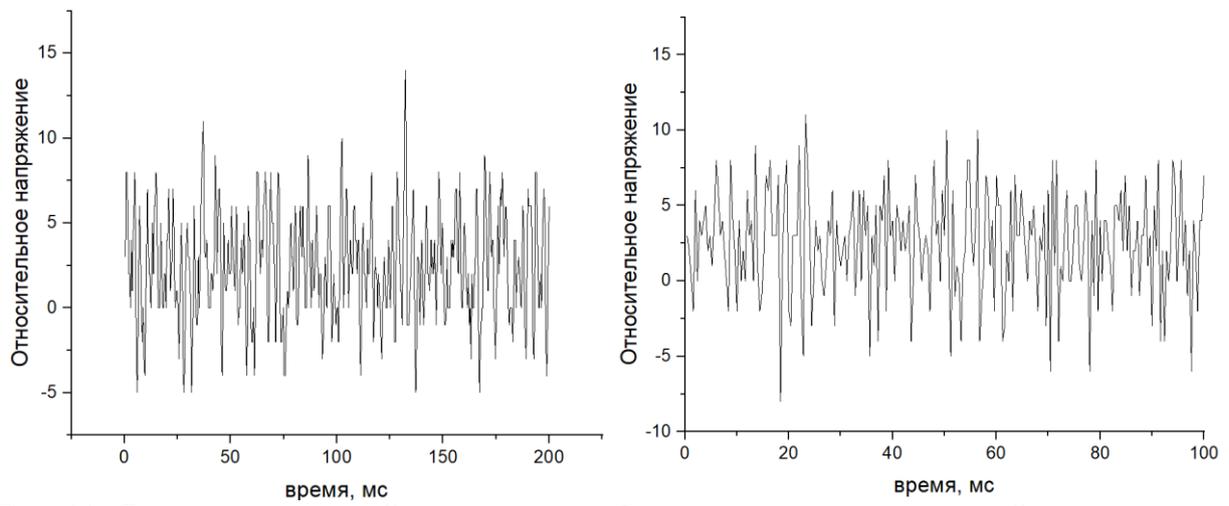


Рис. 11. Сигнал, полученный с лазера при работах систем привязки, левый – метод привязки по склону пика, правый – метод Паунда-Драйвера-Холла.

Выводы

Определены оптимальные настройки ПИД-регулятора для стабилизации частоты излучения титан-сапфирового лазера. Благодаря стабилизации частоты лазера удалось уменьшить влияние акустических шумов и компенсировать медленные тепловые дрейфы элементов резонатора лазера. В то же время, при стабилизации частоты методом Паунда-Дривера-Холла необходима дальнейшая оптимизация схемы стабилизации для повышения ее быстродействия. Была выполнена оценка ширины линии стабилизированного лазера, которая составила 180 кГц (уменьшилась приблизительно с 5 МГц для нестабилизированного лазера). Стабилизированный лазер был использован в проведении экспериментов по лазерному возбуждению холодных атомов рубидия.

Благодарности

Выражаю огромную благодарность своему научному руководителю Бетерову Илье Игоревичу за консультации и помощь в написании курсовой работы.

Благодарю Лабораторию нелинейных резонансных процессов и лазерной диагностики института физики полупроводников за предоставленную возможность проведения экспериментов на имеющемся оборудовании.

Список литературы

1. Банк лекций по радиотехнике и электронике [Электронный ресурс]: <https://siblec.ru/radiotekhnika-i-elektronika>
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения [Текст] / Пер. с англ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 – 512 с. – ISBN 978-5-9221-1096-9.
3. Operator's Manual TIS-SF-777 CW single-frequency ring Ti:Sapphire laser [Текст] / TekhnoScan LASER SYSTEMS.
4. Модель PID-регулятора [Электронный ресурс]: <http://grauonline.de/alexwww/ardumower/pid/pid.html>
5. Жмудь В.А. Электронные системы для прецизионного управления лазерным излучением: учеб. пособие. [Текст] / В.А. Жмудь – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 435 с.