

НИЗКОЧАСТОТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИНКЛИНОМЕТРА

Клемешов Ю.В.

семинар по материалам кандидатской диссертации

Научные руководители: к.ф.м.н. Ляблин М.В., к.т.н. Горбунов Н.В.

24.12.2024

Список использованных сокращений

- МПЛИ – малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр
- ПЧФУ – позиционно-чувствительное фотоприемное устройство
- ССМИ – система стабилизации мощности излучения
- ЛД – лазерный диод
- ФД – фотодиод
- APC – automatic power control (стабилизация мощности излучения)
- ACC – automatic current control (стабилизация тока ЛД)

Актуальность

Нестабильность мощности лазерного излучения, угловое движение луча и шум регистрирующей электроники - составляющие, ограничивающие точность малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра при регистрации низкочастотных физических сигналов.

Для мониторинга низкочастотных ($10^{-5} \dots 10^{-3}$ Гц) сигналов углового движения земной поверхности, относительная долговременная стабильность мощности излучения должна быть в диапазоне 0,1...1%. Существует потребность в использовании системы стабилизации лазерной мощности для поддержания непрерывного излучения в случае нештатных ситуаций.

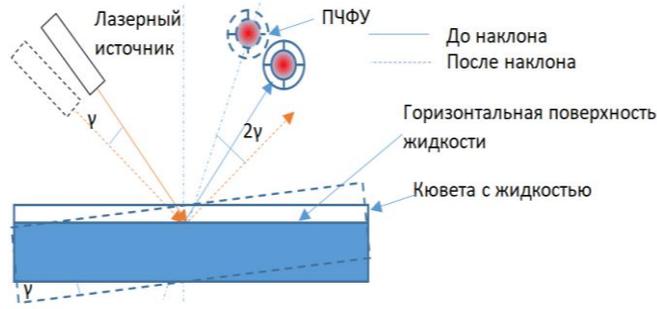
Цель работы - исследование зависимости малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра от низкочастотной стабильности мощности лазерного излучения и разработка системы долговременной стабилизации мощности излучения лазерного источника.

Задачи:

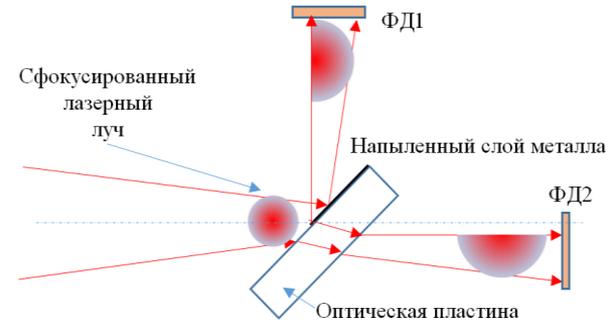
- 1) определить теоретическую и экспериментальную зависимость функционирования малогабаритного инклинометра от стабильности мощности лазерного излучения;
- 2) провести анализ методов стабилизации мощности лазерного излучения и сформировать метод стабилизации лазерной мощности с учетом специфики МПЛИ;

- 3) исследовать долговременную стабильность мощности излучения лазерного источника и влияние факторов, определяющих точность измерений;
- 4) разработать модель лазерного источника для оптимизации параметров регулятора системы стабилизации;
- 5) разработать аппаратную и программную составляющие системы стабилизации мощности излучения и провести ее тестирование

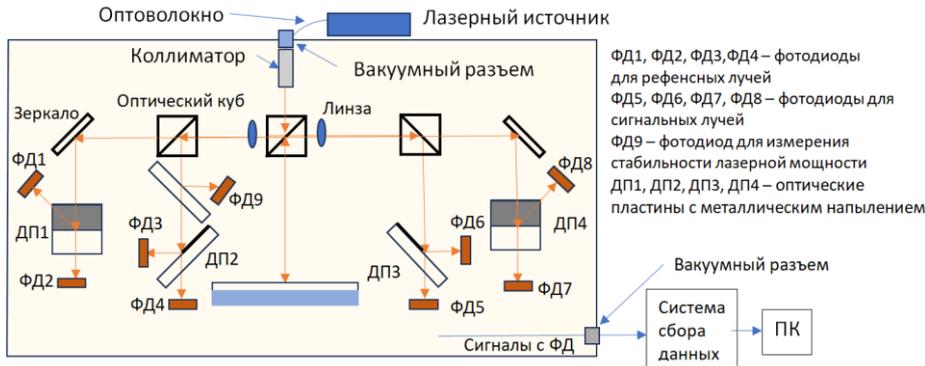
Устройство малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра



Принцип регистрации наклонов земной поверхности



Позиционно-чувствительное фотоприемное устройство (ПЧФУ)



Общая схема прибора

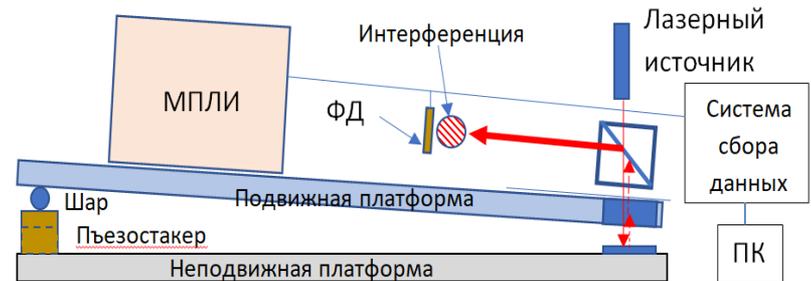


Схема интерференционной калибровки

Теоретический анализ влияния стабильности лазерной мощности

$$U_d(t) = U_{const} + U_{const}U_{stab}(t) = U_{const}(1 + U_{stab}(t)) \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{сигнал на фотодиоде} \\ \text{от лазерного излучения} \end{array}$$

$$\begin{aligned} U_d(t) &= (U_{d_const} + U_{d_signal}(t))(1 + U_{stab}(t)) \\ U_r(t) &= (U_{r_const} + U_{r_signal}(t))(1 + U_{stab}(t)) \quad (2) \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{сигналы на фотодиодах ПЧФУ} \end{array}$$

$$U_{rd}(t) = \frac{U_r(t) - U_d(t)}{U_r(t) + U_d(t)} = \frac{dU_{const} + dU_{signal}(t) + dU_{const}U_{stab}(t) + dU_{signal}(t)U_{stab}(t)}{sU_{const} + sU_{signal}(t) + sU_{const}U_{stab}(t) + sU_{signal}(t)U_{stab}(t)} \quad (3)$$

$$U_{rd}(t) = (dU_{const} + dU_{signal}(t))(1 + U_{stab}(t)) \quad (4) \quad \begin{array}{l} \text{Сигнал с ПЧФУ в} \\ \text{абсолютных величинах} \end{array}$$

Отношение «шум-сигнал» для референсного ПЧФУ:

$$q = \frac{U_{rd_nonstab_laser}(t) - U_{rd_stab_laser}(t)}{dU_{signal}(t)} = U_{rel_stab}(t) \left(\frac{dU_{rel_const}U_{bal}}{dU_{signal}(t)} + 1 \right) \quad (5)$$

Отношение «шум-сигнал» для одного «ортогонального» канала МПЛИ:

$$q_{sig_reg} = \frac{(dU_{sig_const} - dU_{ref_const} + dU_{ph_signal}(t))U_{rel_stab}(t)}{dU_{ph_signal}(t)} \quad (6)$$

U_{const} - постоянная составляющая
 $U_{stab}(t)$ - шумовая составляющая от нестабильности лазерной мощности

$U_{signal}(t)$ - составляющая от углового смещения луча на ПЧФУ

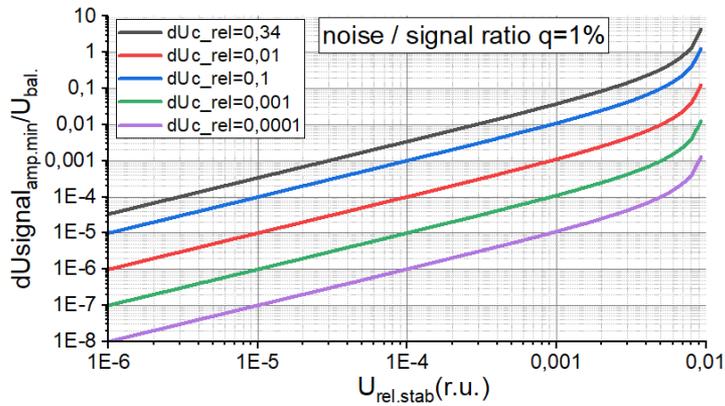
U_{bal} - балансный уровень сигналов на ФД

$$dU_{rel_const} = \frac{dU_{const}}{U_{bal}} -$$

относительная разбалансировка сигналов на ФД ПЧФУ

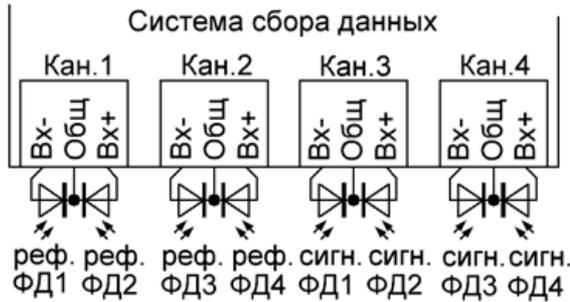
$$U_{rel_stab}(t) = U_{stab}(t)/1$$

– относительная величина шума мощности излучения



$$\frac{dU_{signal}(t)}{U_{bal}} = dU_{rel_const} / \left(\frac{q}{U_{rel_stab}(t)} - 1 \right)$$

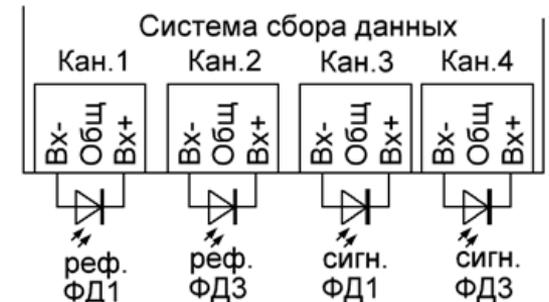
Зависимость относительной амплитуды сигнала с ПЧФУ от относительной стабильности мощности излучения при заданных показателях баланса сигналов на фотодиодах и отношении «шум-сигнал»



а)



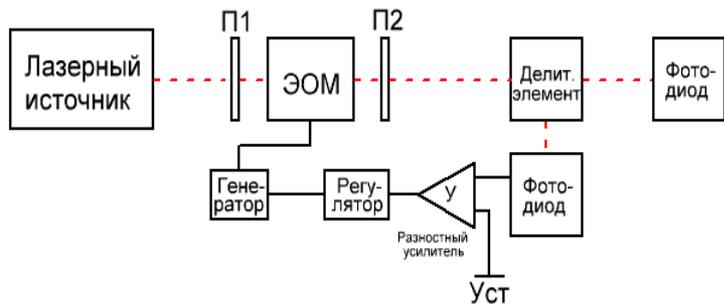
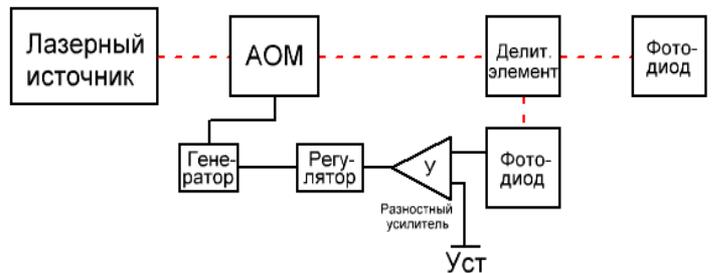
б)



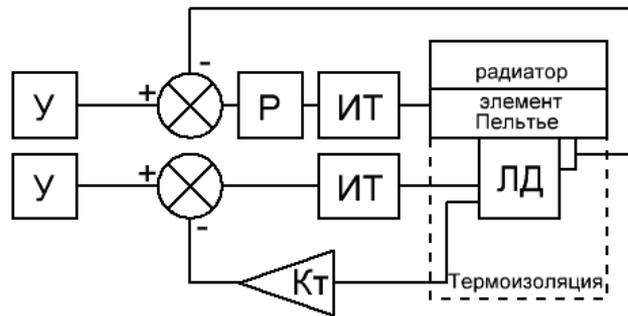
в)

Схемы регистрации сигналов МПЛИ при одноканальном режиме ПЧФУ :
дифференциально-детекторная (а) и одноканальная (б, в) конфигурации

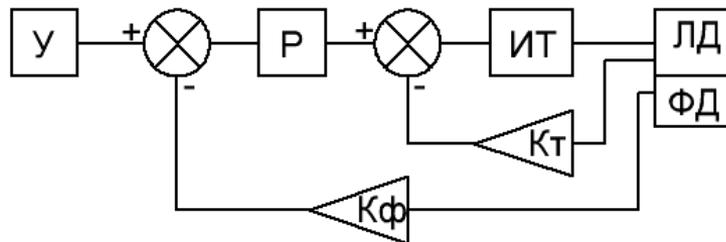
Методы стабилизации мощности излучения полупроводниковых лазерных источников



с использованием оптических модуляторов (АОМ и ЭОМ)



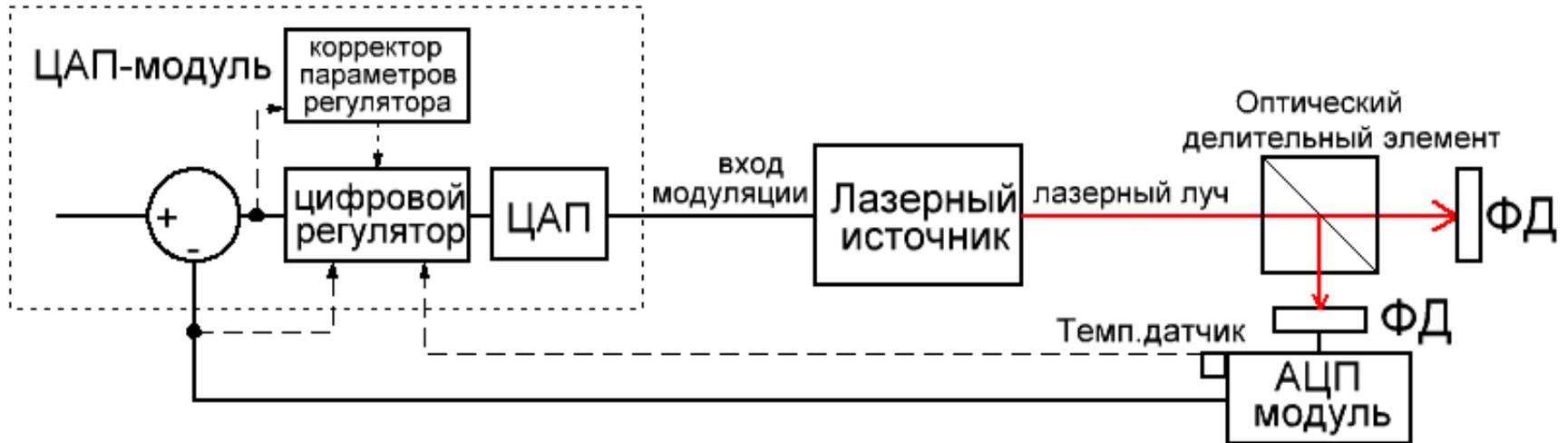
на основе стабилизации температуры и тока излучателя



с использованием встроенного фотодиода

У – уставка,
 Р – регулятор,
 ИТ – источник тока
 Кт – токовый усилитель
 Кф – трансимпедансный усилитель)
 ЛД – лазерный диод
 ФД - фотодиод

Стабилизация мощности излучения с применением цифрового прецизионного регулирования для МПЛИ



Измерение стабильности лазерной мощности



Схема установки

$$\Delta U_{\text{отн}} = \max((\overline{U_{\text{абс}}} - U_{\text{ср}}) / U_{\text{ср}}) - \min((\overline{U_{\text{абс}}} - U_{\text{ср}}) / U_{\text{ср}})$$

Расчет показателя относительной стабильности мощности

Характеристики используемой системы сбора данных

Разрядность и архитектура АЦП	24 бит, сигма-дельта
Кол-во каналов	4 аналоговых / 8 цифровых
Частота выборки	1,173 Гц...4800 Гц
Диапазоны входных сигналов	±10 В; ±1,25 В; ±0,625 В; ±0,3125 В
Температурный дрейф нуля	50нВ/°С
Температурный дрейф усиления	10ppm/°С
Входной шум	~23,6мкВ (при Квн.усил=1), ~2,62мкВ (при Квн.усил=32)

Исследование температурной зависимости системы сбора данных

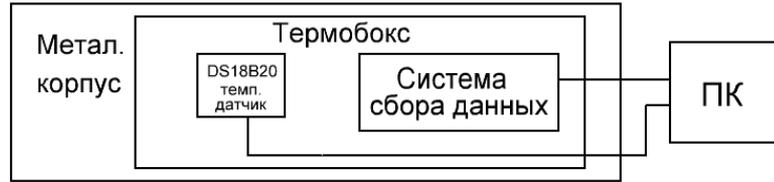


Схема экспериментальной установки для исследования шума и температурной зависимости DAQ-системы

Сравнение результатов измерений за 24 часа

Конфигурация подключения	Размах сигнала	СКО (σ) сигнала	Температурное изменение	Температ. коэф-т $\Delta U_{\text{уср}}/\Delta T$	Температурная корреляция
Без подключений	451,7мкВ	120,4мкВ	0,8°C	482мкВ/°C	0,972
Сопrotивление (3кОм)	2,83мкВ	0,305мкВ	0,8°C	-435нВ/°C	-0,366
Закрытый ФД с сопротивлением	2,943мкВ	0,3046мкВ	0,75°C	-439нВ/°C	-0,323
Закрытый ФД с усилителем	51,8мкВ	5,835мкВ	0,69°C	34,5мкВ/°C	0,252
ФД, регистрирующий лазерное излучение	21мВ	6,96мВ	0,8°C	34,5мВ/°C	-0,835

Исследование линейности световых характеристик фотодиодов

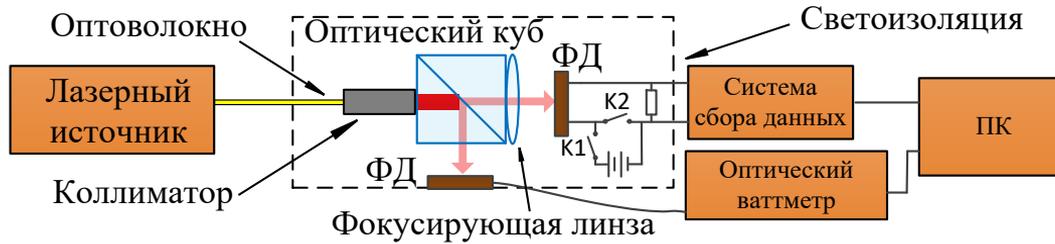
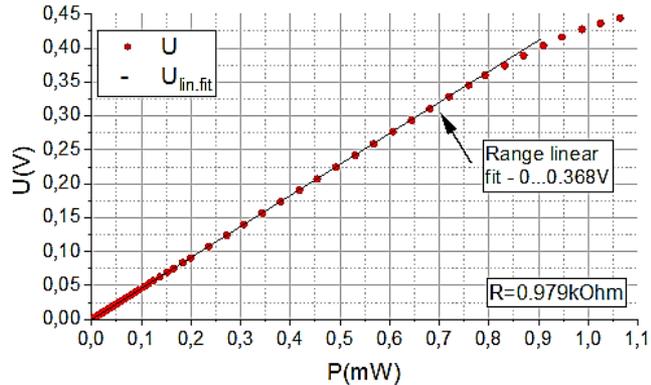
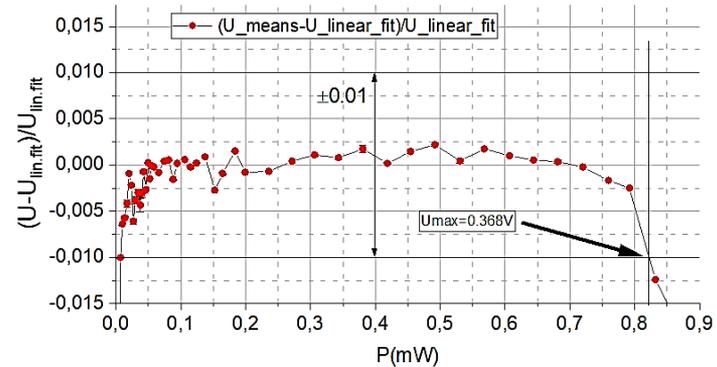


Схема экспериментальной установки по измерению световых характеристик ФД



СВХ фотодиода для нагрузочного сопротивления $R=9790\Omega$ в вентильном режиме



Относительный показатель линейности СВХ

Сравнение показателей линейности световых характеристик фотодиодов

Сопротивление нагрузки R	U_{\max} (мВ) ($\pm \sigma U_{\text{lin}}$) в линейной области /P (мВт) ($\pm \sigma P_{\text{lin}}$), соответствующее U_{\max}			
	S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Вентильный режим				
9790 Ом	350($\pm 0,05$) мВ /0,852($\pm 1 \cdot 10^{-3}$) мВт	352($\pm 0,007$) мВ /0,834($\pm 0,8 \cdot 10^{-4}$) мВт	241,2($\pm 0,004$) мВ /0,805($\pm 0,32 \cdot 10^{-3}$) мВт	226($\pm 0,008$) мВ /0,462($\pm 0,27 \cdot 10^{-3}$) мВт
2.17кОм	352,2($\pm 0,038$) мВ /0,4($\pm 0,57 \cdot 10^{-3}$) мВт	359($\pm 0,052$) мВ /0,375($\pm 0,34 \cdot 10^{-3}$) мВт	182,3($\pm 0,01$) мВ /0,27($\pm 0,27 \cdot 10^{-3}$) мВт	134,63($\pm 0,008$) мВ /0,124($\pm 0,24 \cdot 10^{-3}$) мВт
5.07кОм	301,7($\pm 0,13$) мВ /0,1454($\pm 0,43 \cdot 10^{-3}$) мВт	292,6($\pm 0,026$) мВ /0,132($\pm 0,26 \cdot 10^{-3}$) мВт	209,1($\pm 0,013$) мВ /0,132($\pm 0,25 \cdot 10^{-3}$) мВт	138($\pm 0,001$) мВ /0,054($\pm 0,16 \cdot 10^{-4}$) мВт
9.95кОм	333,1($\pm 0,205$) мВ /0,0845($\pm 0,365 \cdot 10^{-3}$) мВт	309($\pm 0,046$) мВ /0,07($\pm 0,17 \cdot 10^{-3}$) мВт	217($\pm 0,017$) мВ /0,069($\pm 0,4 \cdot 10^{-4}$) мВт	157,4($\pm 0,003$) мВ /0,031($\pm 0,2 \cdot 10^{-4}$) мВт
14.9кОм	344,1($\pm 0,25$) мВ /0,05($\pm 0,286 \cdot 10^{-3}$) мВт	301,6($\pm 0,076$) мВ 0,046($\pm 0,07 \cdot 10^{-5}$) мВт	220,3($\pm 0,017$) мВ /0,047($\pm 0,4 \cdot 10^{-4}$) мВт	72,4($\pm 0,005$) мВ /0,01($\pm 0,2 \cdot 10^{-4}$) мВт

Сравнение показателей линейности световых характеристик фотодиодов

Сопrotивление нагрузки R	$U_{\max}(B) \pm \sigma U_{lin}$ в линейной области $/P (мВт) \pm \sigma P_{lin}$, соответствующее U_{\max}			
	S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Фотодиодный режим				
9.95кОм	3,4($\pm 0,024 \cdot 10^{-3}$) В /0,717($\pm 0,83 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,44($\pm 0,064 \cdot 10^{-3}$) В /0,795($\pm 0,07 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,327($\pm 0,057 \cdot 10^{-3}$) В 1,06($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,23($\pm 0,08 \cdot 10^{-3}$) В /0,646($\pm 0,4 \cdot 10^{-3}$) мВт
14.9кОм	3,36($\pm 0,276 \cdot 10^{-3}$) В /0,55($\pm 0,8 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,42($\pm 0,086 \cdot 10^{-3}$) В /0,526($\pm 0,35 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,283($\pm 0,175 \cdot 10^{-3}$) В /0,707($\pm 0,44 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,157($\pm 0,15 \cdot 10^{-3}$) В /0,42($\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$) мВт
237кОм	3,167($\pm 0,85 \cdot 10^{-3}$) В /0,0326($\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,25($\pm 0,68 \cdot 10^{-3}$) В /0,0312($\pm 0,46 \cdot 10^{-4}$) мВт	3,223($\pm 0,65 \cdot 10^{-3}$) В /0,043($\pm 0,7 \cdot 10^{-4}$) мВт	3,12($\pm 0,41 \cdot 10^{-3}$) В /0,026($\pm 0,4 \cdot 10^{-4}$) мВт
1МОм	2,22($\pm 0,26 \cdot 10^{-3}$) В /0,00542($\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$) мВт	3,25($\pm 0,25 \cdot 10^{-3}$) В /0,0074($\pm 0,16 \cdot 10^{-4}$) мВт	2,68($\pm 0,26 \cdot 10^{-3}$) В /0,0086($\pm 0,22 \cdot 10^{-4}$) мВт	2,6($\pm 0,28 \cdot 10^{-3}$) В /0,0052($\pm 0,2 \cdot 10^{-4}$) мВт

Измерение низкочастотного шума оптоизолированных фотодиодов

Сравнение показателей шума при 4-х подключаемых образцах ФД

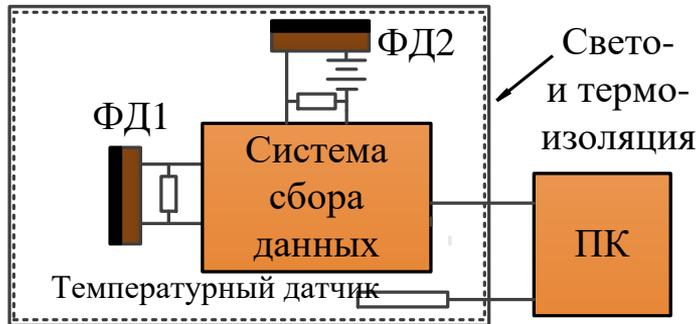
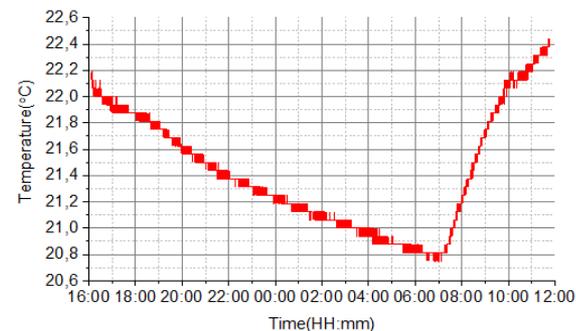
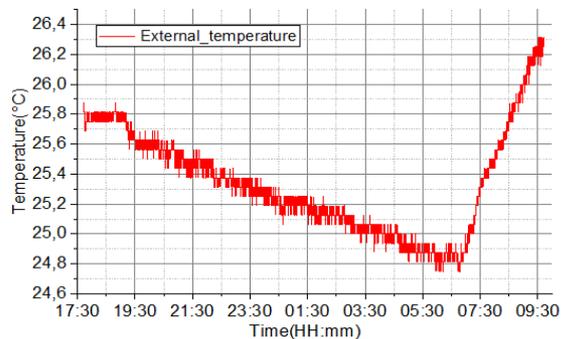
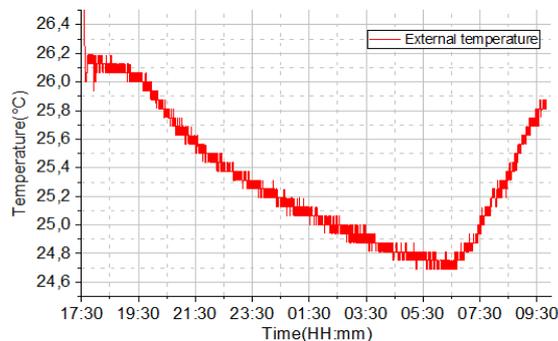
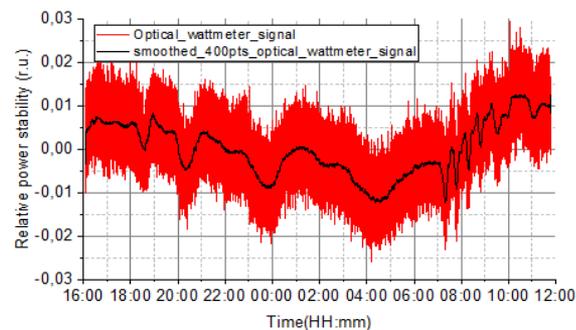
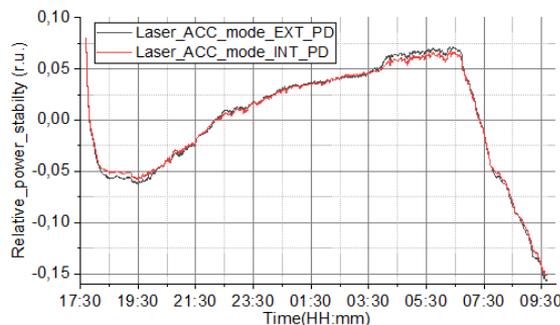
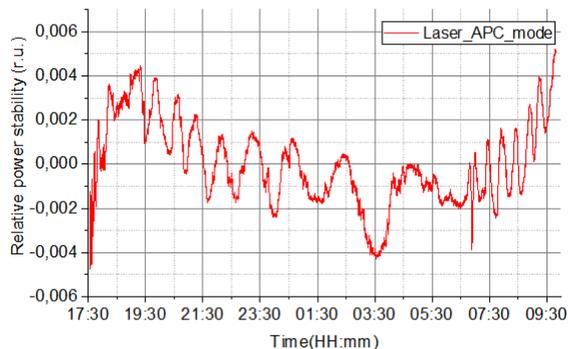


Схема экспериментальной установки по измерению шума канала DAQ-системы при подключенных ФД

Режим работы	Сопротивление R	Размах амплитуды шума (peak-to-peak) $\pm \sigma$ (СКО) по данным за 24 часа			
		S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
вентиляционный	R = 14.9кОм	3,1 \pm 0,3 мкВ	3,02 \pm 0,32 мкВ	3,06 \pm 0,3 мкВ	3,02 \pm 0,3 мкВ
	R = 240кОм	7,53 \pm 1,3 мкВ	8,04 \pm 1,17 мкВ	5,9 \pm 0,66 мкВ	6,07 \pm 0,7 мкВ
фотодиодный	R = 14.9кОм	2,94 \pm 0,31 мкВ	3,1 \pm 0,3 мкВ	3,1 \pm 0,3 мкВ	3,02 \pm 0,3 мкВ
	R = 240кОм	8,7 \pm 1,4 мкВ	12,2 \pm 1,07 мкВ	6,78 \pm 0,9 мкВ	7,53 \pm 0,1 мкВ

Анализ динамики долговременной стабильности мощности излучения

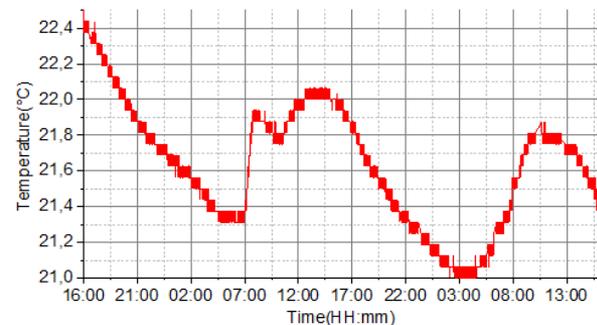
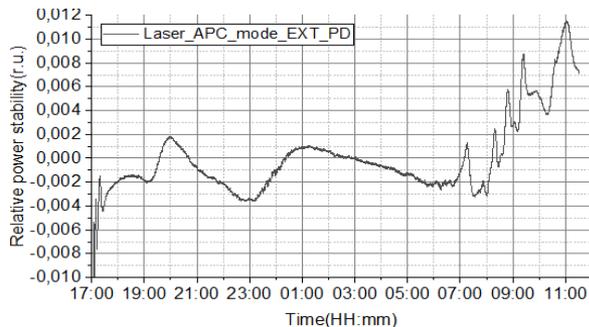
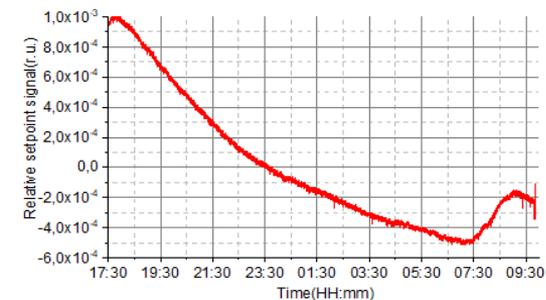
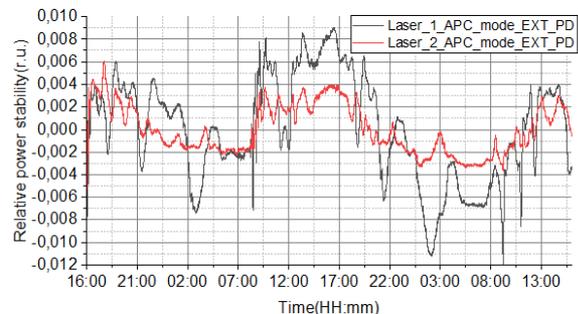
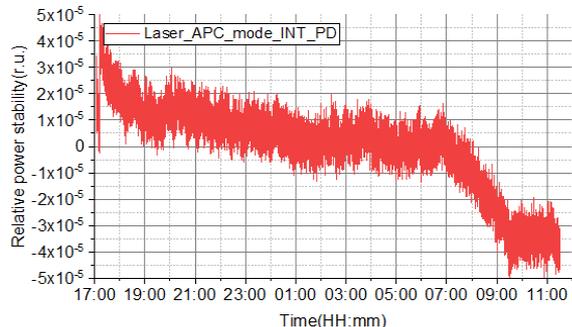
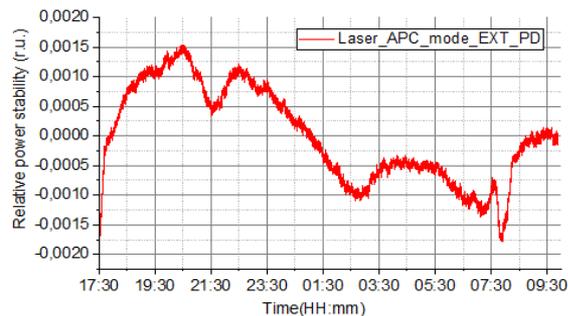


АРС-режим драйвера
($t_{\text{ИЗМ}} = 18\text{ч.}$)

АСС-режим драйвера
($t_{\text{ИЗМ}} = 18\text{ч.}$)

АРС-режим, измерение
оптическим ваттметром
($t_{\text{ИЗМ}} = 20\text{ч.}$)

Анализ динамики долговременной стабильности мощности излучения

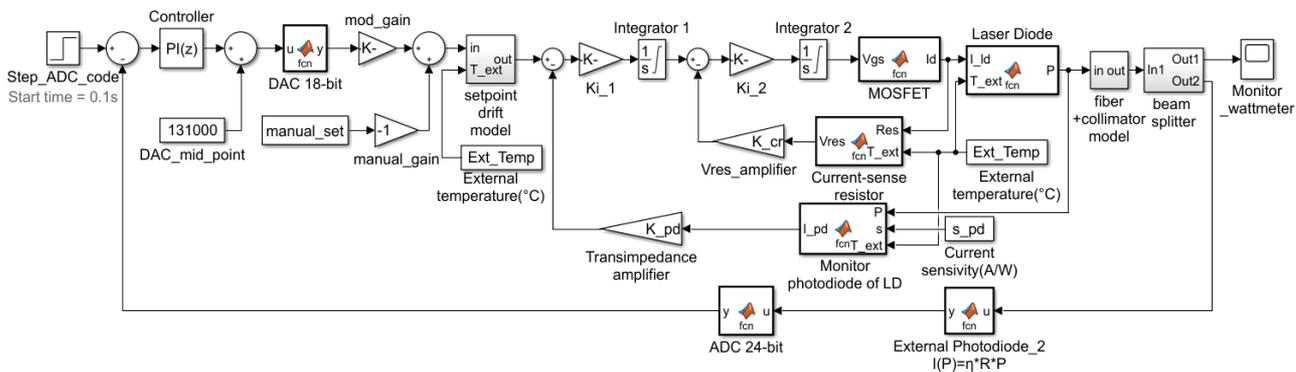


Сравнение сигнала лазерной мощности с вариацией сигнала уставки драйвера ($t_{\text{изм}} = 18\text{ч.}$)

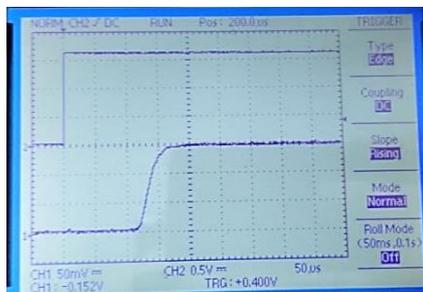
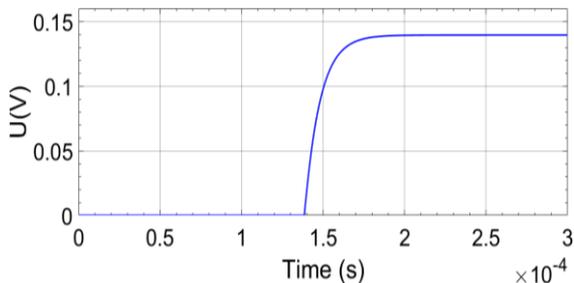
Сравнение сигналов лазерной мощности с встроенного в ЛД и внешнего фотодиодов ($t_{\text{изм}} = 18\text{ч.}$)

Сравнение стабильности лазерной мощности двух лазерных источников ($t_{\text{изм}} = 48\text{ч.}$)

Функциональное моделирование лазерного источника



Simulink-модель лазерного источника МПЛИ с подключенной ССМИ

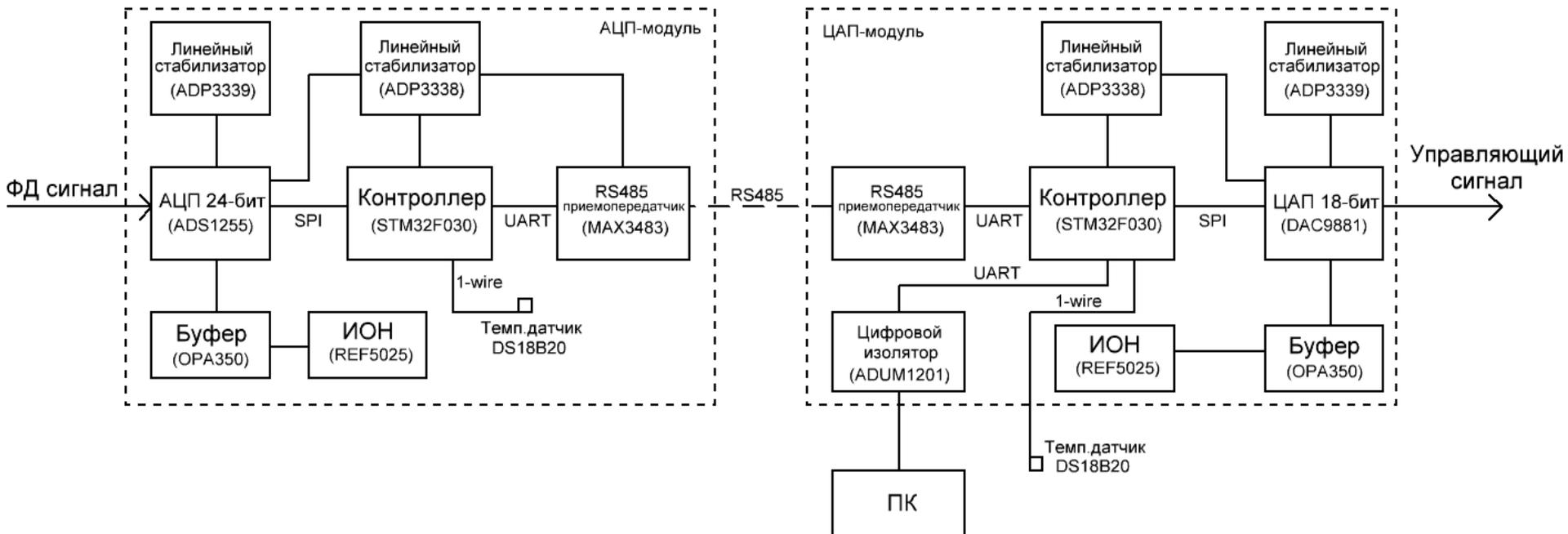


Моделируемая и реальная переходные характеристики лазерного источника

Сравнение размаха выходных колебаний мощности излучения при различных цифровых регуляторах по результатам моделирования

Тип регулятора	Параметры регулятора	Размах колебаний мощности при $T_{\text{модел.}} = 1800\text{с, мВт}$	
		без внешней ССМИ	с внешней ССМИ
И-	$I = 1,4050$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$8,38 \cdot 10^{-4}$
ПИ-	$P = 0,2339;$ $I = 2,2078$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$5,38 \cdot 10^{-4}$
ПИД-	$P = 0,1121;$ $I = 2,2118; D = -$ $2,125 \cdot 10^{-4}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$

Аппаратная реализация системы стабилизации



Программная составляющая системы стабилизации



Для управления модулями ССМИ через ПК разработано программное обеспечение нижнего и верхнего уровня с возможностью конфигурации параметров АЦП и ЦАП, цифрового регулятора, запуском процесса стабилизации, мониторингом изменения температуры и т.д.

Тестирование системы стабилизации мощности излучения

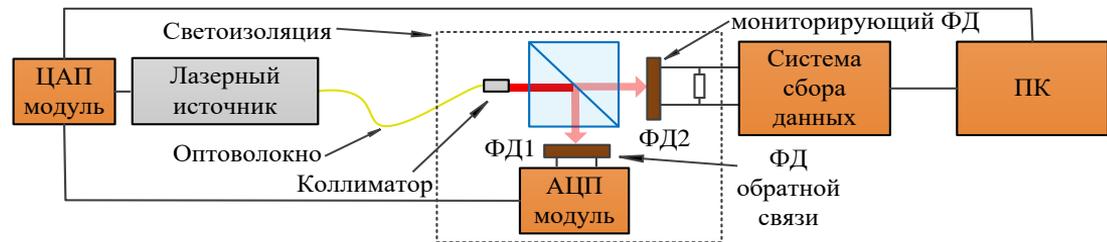
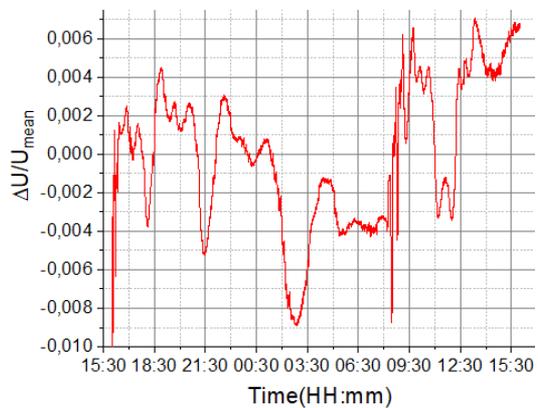
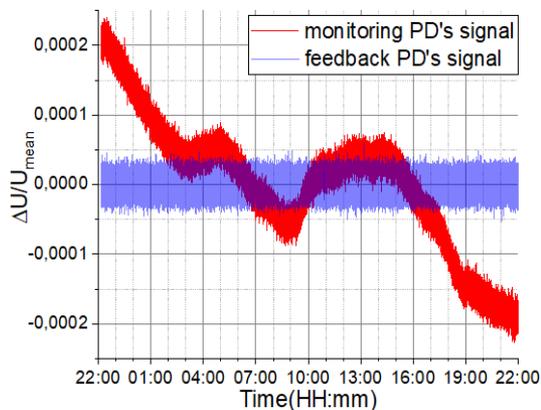


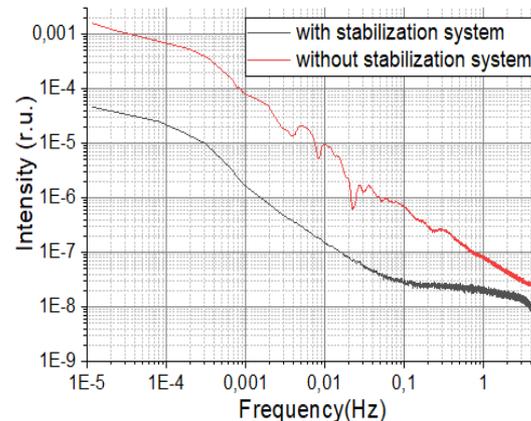
Схема экспериментального
стенда



а)



б)

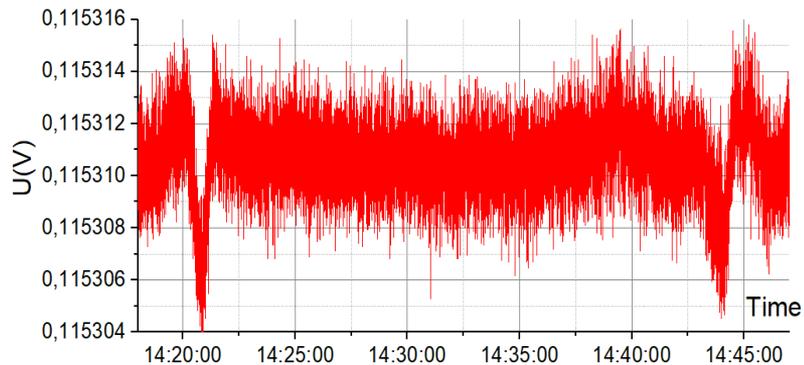


в)

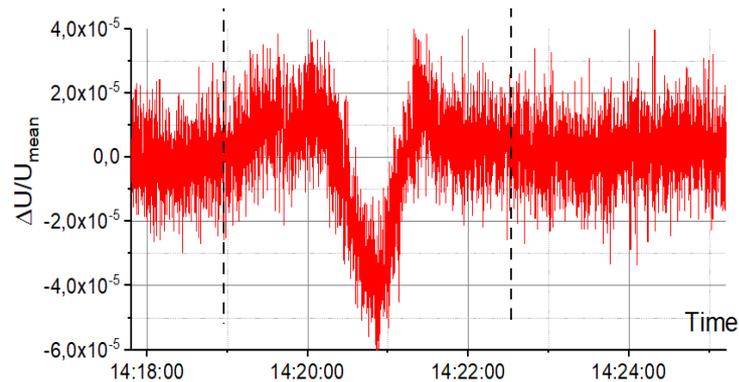
Относительная стабильность мощности излучения: на мониторирующем ФД без ССМИ(а), на мониторирующем ФД и ФД обратной связи с ССМИ(б); в) АЧХ по данным рис. (а) и (б)

Тестирование системы стабилизации мощности излучения

Реакция системы на внешнее возмущение



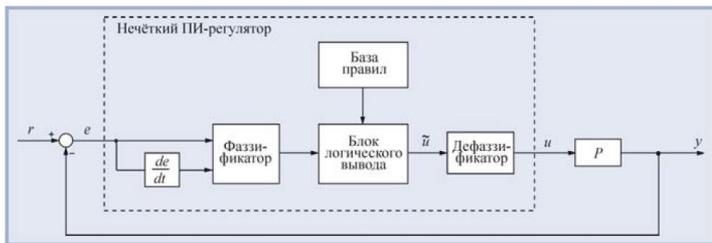
а)



б)

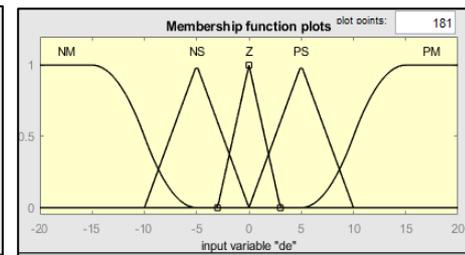
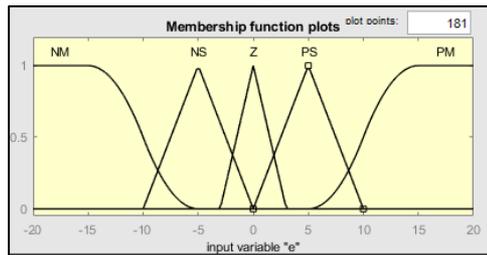
Сигнал с ФД обратной связи системы стабилизации в условиях работающей системы кондиционирования: а) в абсолютной шкале; б) в относительной шкале

Применение нечеткой логики в регуляторе системы



Структура нечеткого ПИ-регулятора с объектом управления

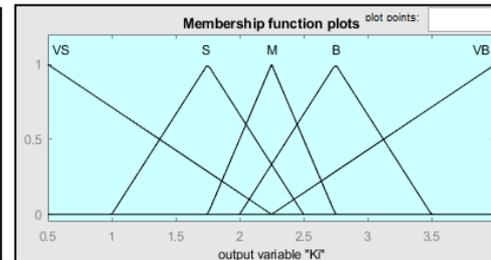
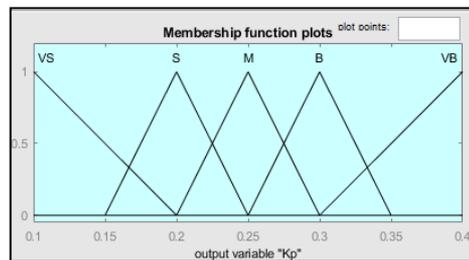
Функции принадлежности



для входных переменных нечеткого ПИ-регулятора (ошибки и разности ошибок; NM – negative medium, NS – negative small; Z – zero; PS – positive small; PM – positive medium)

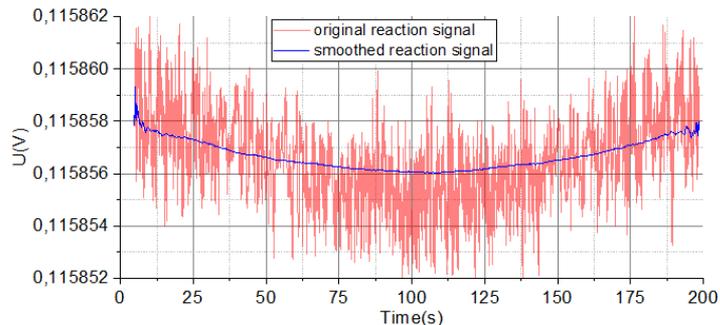
e \ de	NM	NS	Z	PS	PM
NM	VB/VB ³	B/VB ³	VS/S ²	S/S ²	M/M ²
NS	B/VB ³	M/VB ¹	M/M ¹	B/M ¹	B/B ²
ZE	B/VB ³	M/B ¹	M/M ¹	M/B ¹	VB/VB ³
PS	B/B ²	B/M ¹	M/B ¹	VB/VB ¹	VB/VB ³
PM	M/M ²	S/S ²	B/S ²	B/VB ³	VB/VB ³

Таблица нечетких правил для вывода коэффициентов регулятора

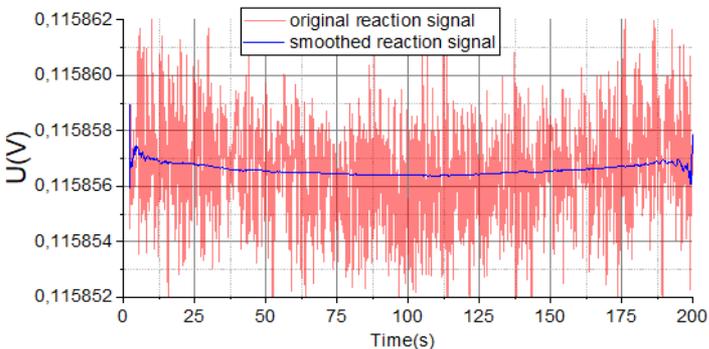


для выходных переменных (пропорц. и интегр. коэф-в; VS – very small; S – small; M – medium; B – big; VB – very big)

Применение нечеткой логики в регуляторе системы

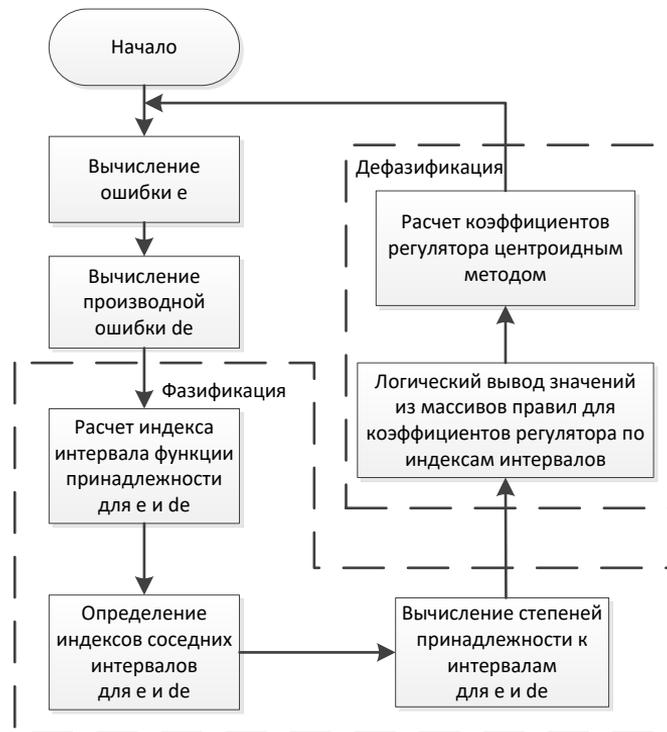


а)



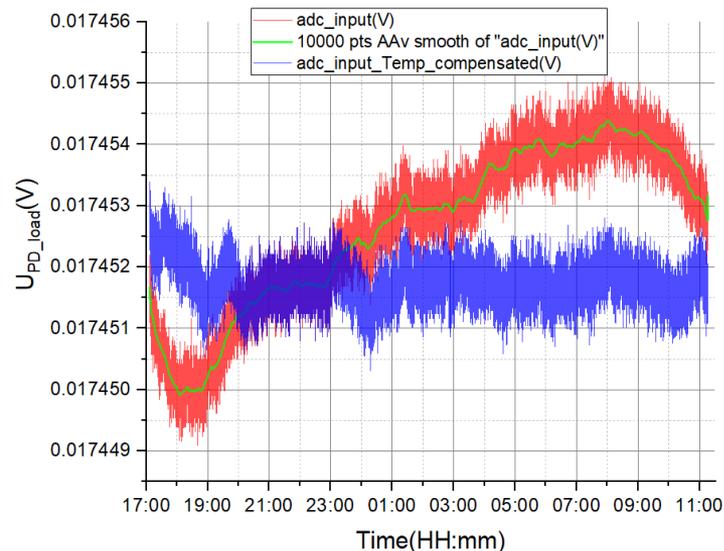
б)

Сигналы с ФД обратной связи при низкочастотном возмущении ССМИ на основе: а) стандартного ПИ-регулятора; б) ПИ-регулятора на основе нечеткой логики



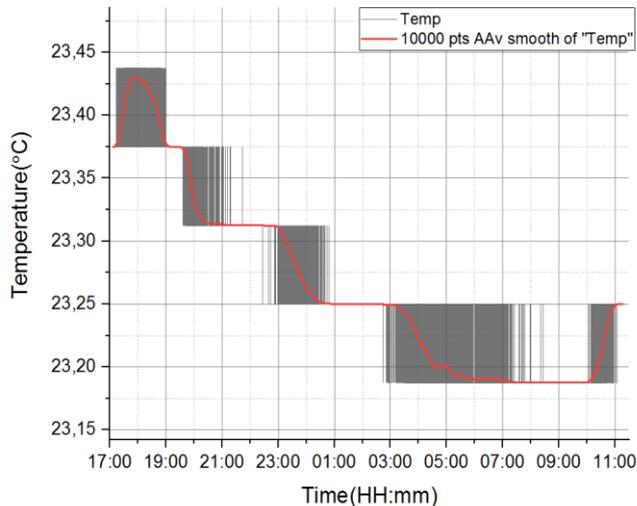
Блок-схема алгоритма коррекции параметров регулятора

Температурная зависимость АЦП-модуля системы стабилизации



а)

а) Сигнал на входе АЦП модуля при нагрузке 1кОм с оптически изолированным ФД без термокомпенсации (красн.) и с термокомпенсацией (син.) ; б) сигнал с датчика температуры DS18B20



б)

Программная термокомпенсация измерений АЦП-модуля:

$$adc_data_new = adc_data_curr - K_T (T_{curr} - T_{ref})$$

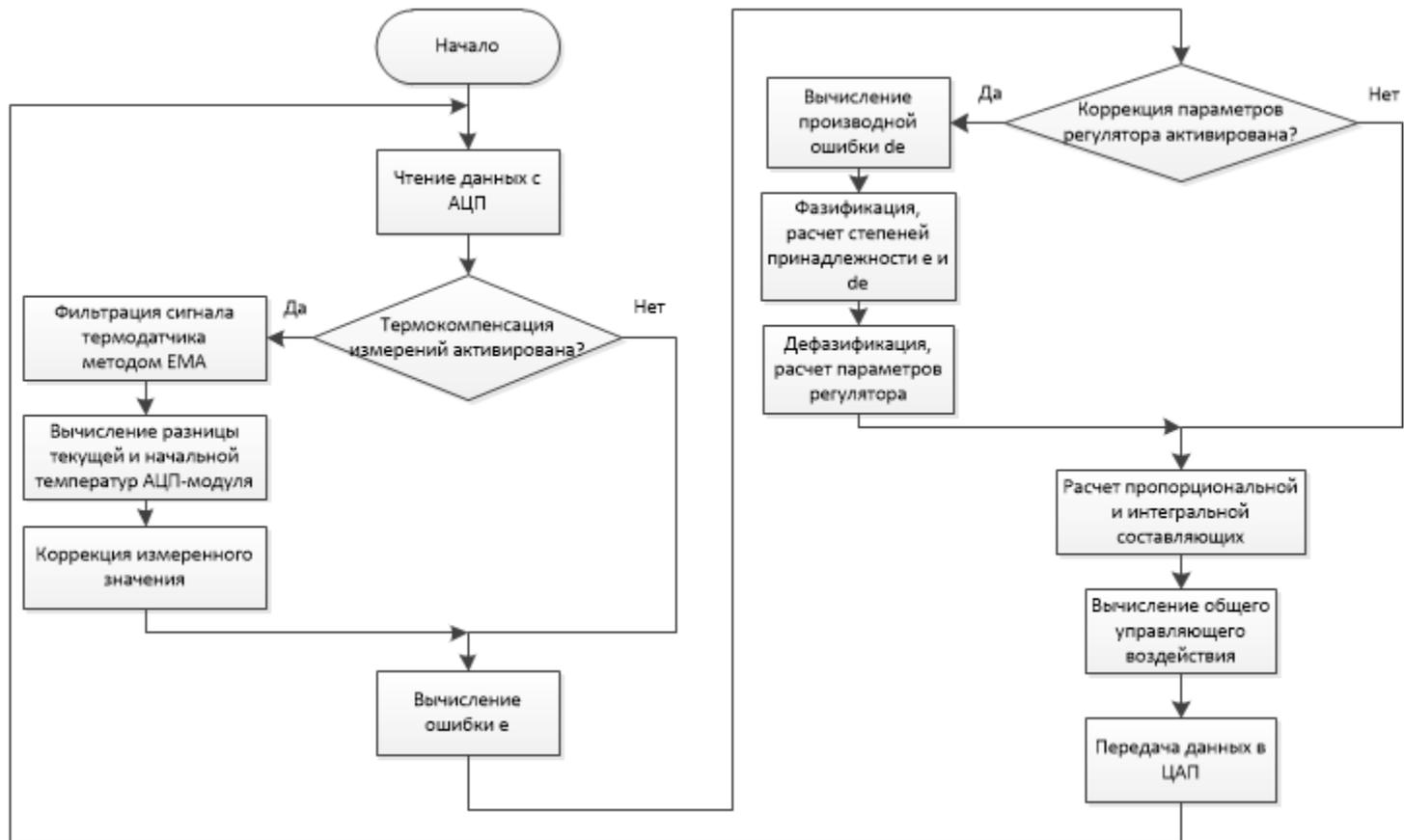
adc_data_new – пересчитанный код АЦП
 adc_data_curr – текущий код АЦП

K_T – температурный коэффициент

T_{curr} – текущее значение температуры

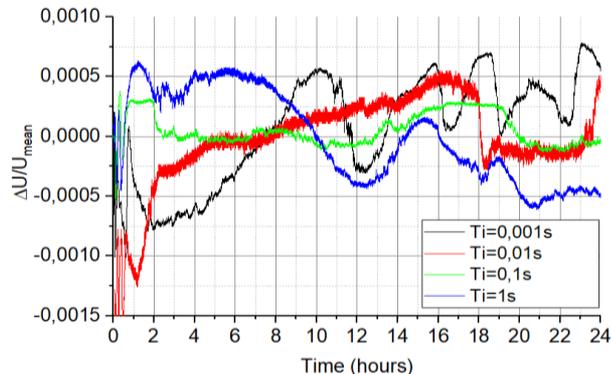
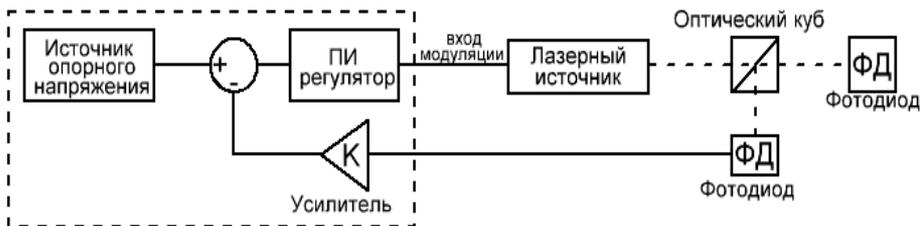
T_{ref} – начальное значение температуры

Общий алгоритм цифрового регулятора системы стабилизации

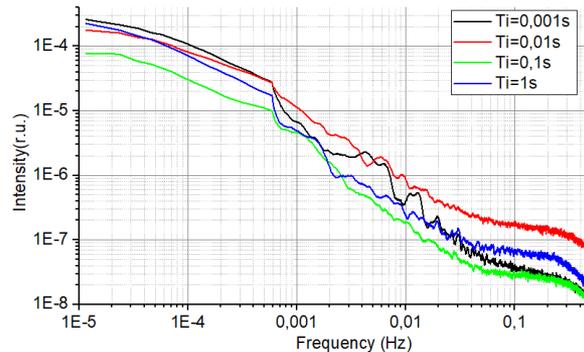


Реализация альтернативных систем стабилизации мощности излучения

1) На основе аналогового АРС-контура с внешним ФД



Относительная стабильность мощности при различных постоянных времени И-звена регулятора



АЧХ

Реализация альтернативных систем стабилизации мощности излучения

2) На основе термостабилизации лазерного диода

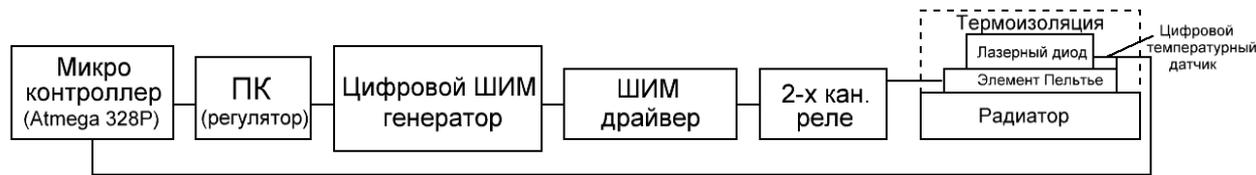
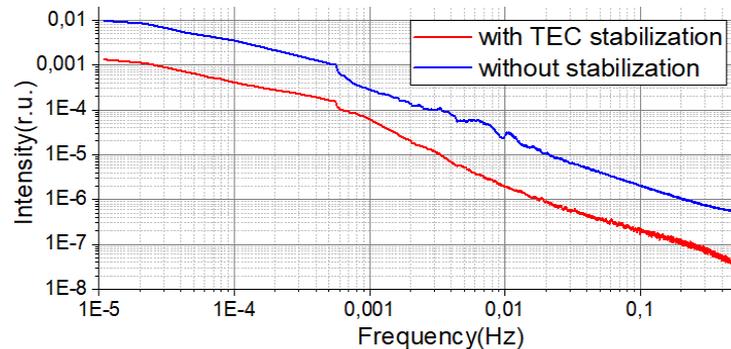
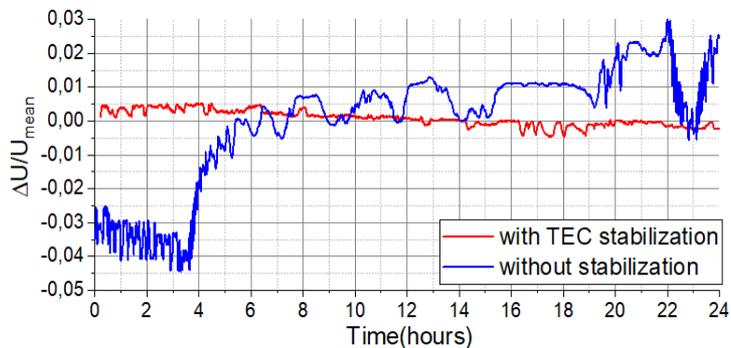


Схема термостабилизации ЛД с помощью элемента Пельтье



Относительная стабильность мощности без и совместно с термостабилизацией ЛД

Анализ функционирования референсного ПЧФУ МПЛИ от стабильности мощности излучения

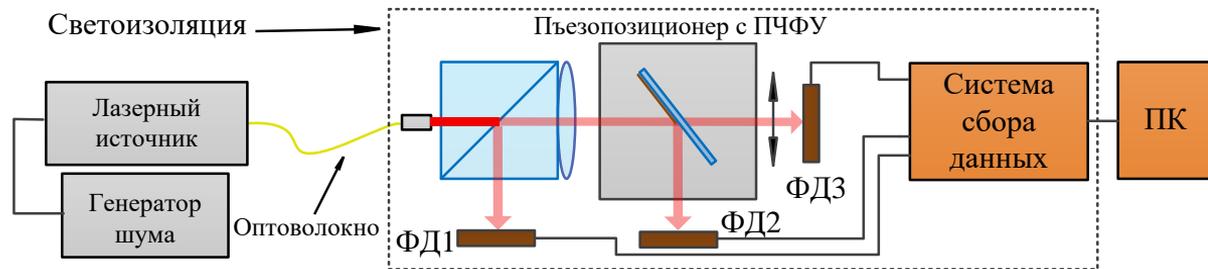
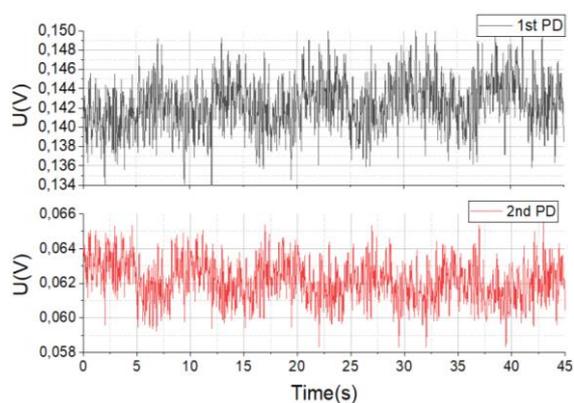
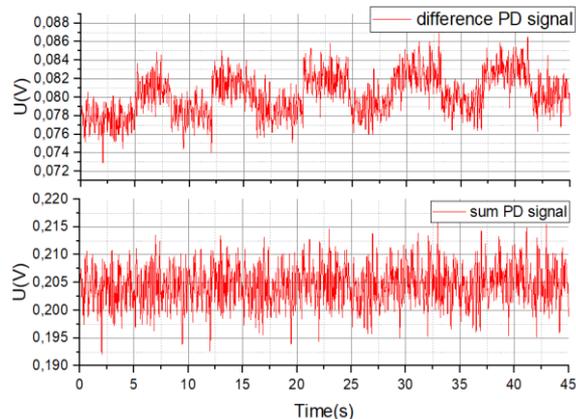


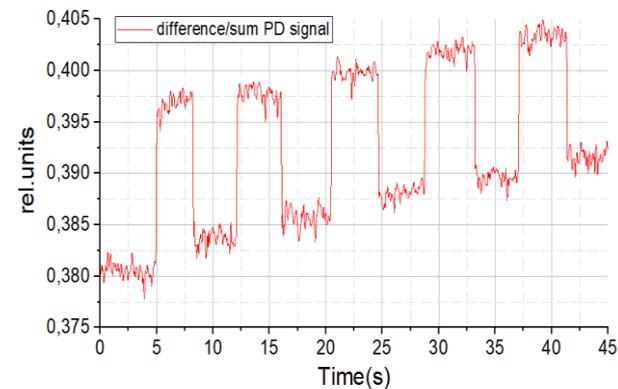
Схема экспериментального
стенда для исследования
зависимости референсного ПЧФУ
МПЛИ от стабильности мощности
излучения



а)

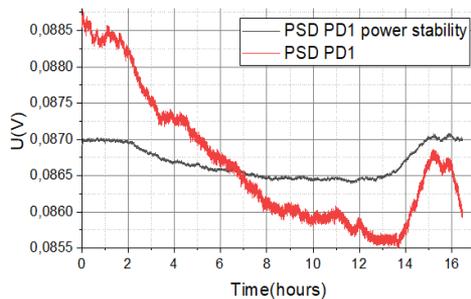


б)

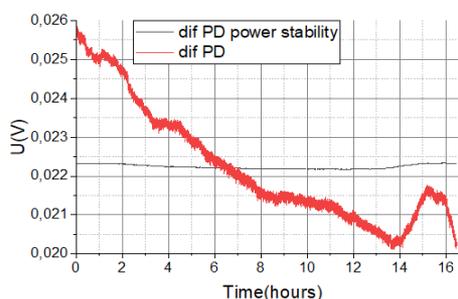


в)

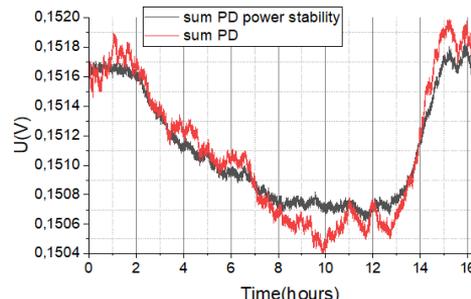
Сигналы с ФД ПЧФУ (а), их разность и сумма (б), отношение разности и суммы (в)



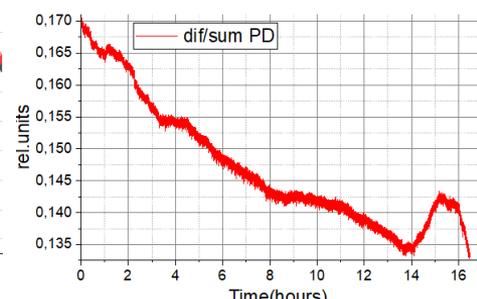
а)



б)

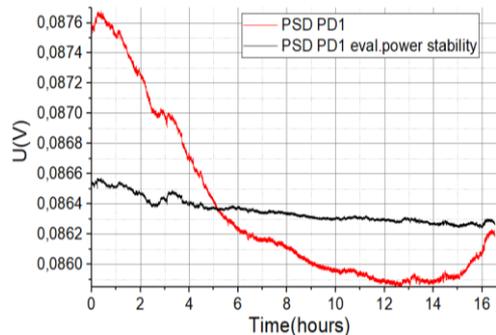


в)

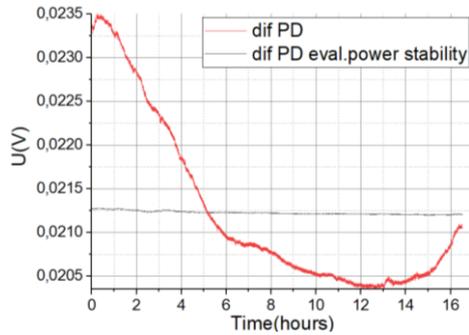


г)

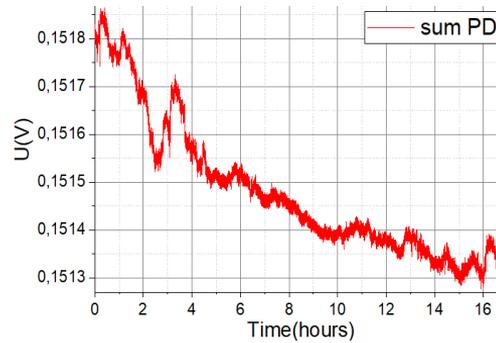
Сравнение составляющей нестабильности мощности излучения с сигналом на 1-м ФД ПЧФУ (а), разницей сигналов ФД ПЧФУ(б), суммой сигналов ФД ПЧФУ(в) без использования ССМИ; г) отношение разницы и суммы



а)



б)



в)

Сравнение составляющей нестабильности мощности излучения с сигналом на 1-м ФД ПЧФУ(а), разницей сигналов с ФД ПЧФУ(б), суммой сигналов с ФД ПЧФУ(в) при использовании ССМИ

Анализ функционирования сигнального ПЧФУ МПЛИ от стабильности мощности излучения

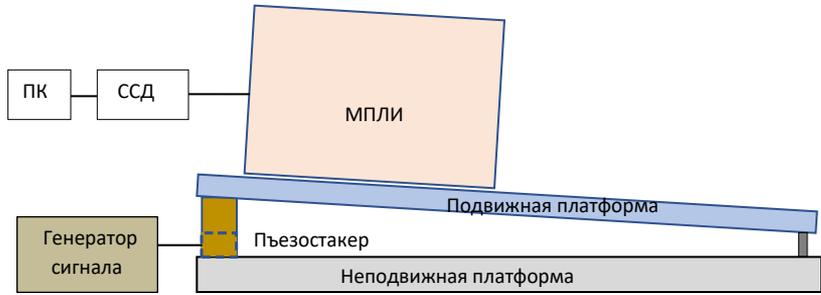
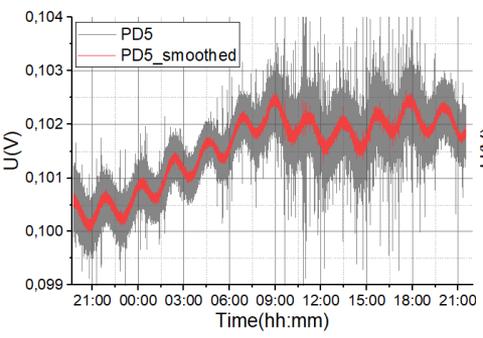
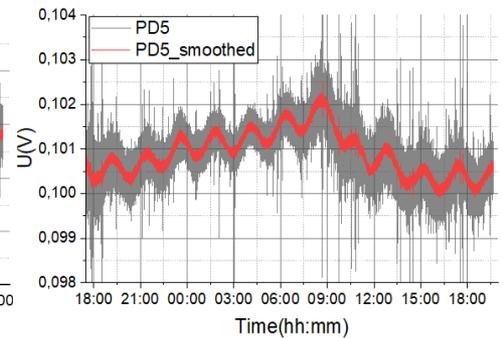


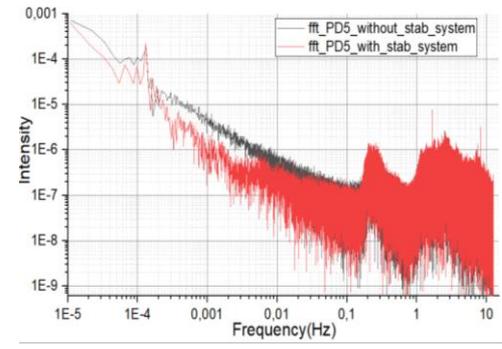
Схема экспериментального стенда для исследования зависимости сигнального ПЧФУ МПЛИ от стабильности мощности излучения



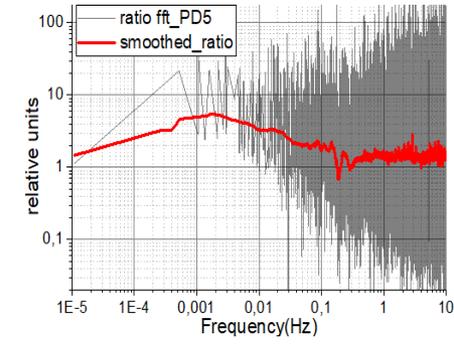
а)



б)



в)



г)

График сигнала с 5-го (сигнального) ФД МПЛИ: а) без подключенной ССМИ к лазерному источнику; б) с подключенной ССМИ; в) амплитудно-частотный спектры по данным графиков (а) и (б); г) отношение спектров

Основные результаты работы

1) При исследовании зависимости сигналов ПЧФУ МПЛИ от стабильности лазерной мощности определено её влияние при однодетекторной и дифференциально-детекторной конфигурации позиционно-чувствительного устройства инклинометра в случае регистрации сигналов, вызванных низкочастотными наклонами земной поверхности.

Применение системы стабилизации мощности излучения в МПЛИ при однодетекторной регистрации сигнала наклона уменьшает амплитудный шум от нестабильности мощности излучения в среднем в 5 раз в частотном диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Гц, а на частотах, близких к частоте основного сигнала - примерно в 2 раза.

Основные результаты работы

2) Проведен анализ методов стабилизации мощности лазерного излучения и предложен метод стабилизации мощности на основе прецизионного цифрового регулирования, применение которого улучшает относительную суточную стабильность мощности в 43 раза. На основе данного метода разработана и исследована ССМИ для лазерного источника МПЛИ.

3) Исследована долговременная стабильность мощности излучения лазерного источника МПЛИ и влияние факторов, определяющих точность измерений: уровень низкочастотного шума и температурная зависимость системы сбора данных, диапазон линейности световых характеристик и низкочастотные шумы ФД в частотном диапазоне 10^{-5} ..5Гц. Получена положительная корреляция между данными с канала без подключений, имеющего высокий входной импеданс и данными с температурного датчика. Установлено, что уровень максимальной границы линейного диапазона световой характеристики в вентильном режиме зависит от емкости ФД, а уровень шума в низкочастотной области 10^{-3} ... 10^{-2} Гц больше при фотодиодном режиме, чем при вентильном.

Основные результаты работы

4) Разработана функциональная модель лазерного источника, выполнен анализ ее характеристик и верификация с экспериментальными данными. На основе данной модели проведена оптимизация параметров трех цифровых регуляторов ССМИ.

5) Реализованы аппаратная и программная составляющие ССМИ, проведено исследование качества её работы на суточном интервале времени. Предложено использование термокомпенсации измерений с ФД АЦП-модуля ССМИ и реализован цифровой регулятор на основе нечеткой логики для улучшения работы ССМИ при внешних возмущениях.

Публикации по теме работы

В рецензируемых изданиях перечня ВАК

1) М.В.Ляблин, Н.В.Атанов, И.В.Бедняков, Ю.А.Будагов, В.В.Глаголев, Ю.В. Клемешов, А.В.Краснопёров, А.М.Кузькин, Р.В. Ни, А.А.Плужников, К.Д.Поляков, А.А. Селецкий, Г.В.Трубников, Б.Ди Джироламо. Компактный прецизионный лазерный инклинометр: измерение сигналов и шумов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2023. – Т. 54. – №. 4. – С. 959-983.

2) М.В. Ляблин, Ю.В. Клемешов Стабилизация мощности лазерного излучения в Прецизионном Лазерном Инклинометре / Письма в ЭЧАЯ. – Дубна, 2023. – Т.20. - №2, 137-161с.

3) М.В. Ляблин, Ю.В. Клемешов Исследование фотовольтаического и фотодиодного режимов работы фотодиодов для их применения в Малогабаритном Прецизионном Лазерном Инклинометре / Письма ЭЧАЯ. – Дубна, 2024– Т. 21. – № 6. – с.1068–1085

В сборниках трудов конференций

1. Горбунов Н.В., Клемешов Ю.В. Разработка драйвера лазерного модуля для прецизионного лазерного инклинометра. Сборник тезисов Второй Всероссийской школы-конференции Государственного университета «Дубна»: «Фундаментальная физика и прикладные технологии», 2023

2. Исрапилов Д.И., Ляблин М.В., Красноперов А.М., Глаголев В.В., Кузькин А.М., Селецкий А.А., Плужников А.А., Ни Р.В., **Клемешов Ю.В.**, Глухов В.Е., Паровик Р.И. Прецизионный лазерный инклинометр: первичные результаты работы на Камчатке // Материалы V Всероссийской молодежной научной школы "Геосферы и космос": сборник материалов, Петропавловск-Камчатский, 02–03 октября 2023 года. – Петропавловск-Камчатский: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2023. – С. 13.

3. А.Г. Аронов, Г.А. Аронов, И.В. Бедняков, К.С. Бунятов, В.В. Глаголев, **Ю.В. Клемешов**, А.В. Красноперов, А.М. Кузькин, А.А. Курсевич, А.А. Левченко, М.В. Ляблин, Р.В. Ни, А.А. Плужников, К.Д. Поляков. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА БАЗЕ ИНКЛИНОМЕТРА МПЛИ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «НАРОЧЬ» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVIII Международной сейсмологической школы, 2024

Прочие публикации

Горбунов Н.В., Клемешов Ю.В. Система управления пьезостакером для лазерного инклинометра/Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна» (РИНЦ). - Серия: Естественные и инженерные науки. – 2019.

Научная новизна

- 1) Впервые проведено исследование зависимости функционирования малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра от стабильности мощности излучения, которое показывает, что колебания мощности излучения оказывают влияние при однодетекторной и дифференциально-детекторной конфигурации позиционно-чувствительного устройства инклинометра в случае регистрации сигналов, вызванных низкочастотными наклонами земной поверхности.
- 2) Предложен метод долговременной стабилизации мощности излучения для малогабаритного инклинометра на основе прецизионного цифрового регулирования, включающий возможность термокомпенсации сигнала с АЦП и автоматическую подстройку параметров регулятора на основе нечеткой логики для уменьшения влияния внешних возмущений. Применение данного метода увеличивает относительную суточную стабильность лазерной мощности в 43 раза.
- 3) Разработаны цифровые функциональные модели маломощного лазерного источника инклинометра и системы стабилизации мощности излучения, повышающие точность настройки и оптимизации параметров цифрового регулятора.

Научные результаты и положения

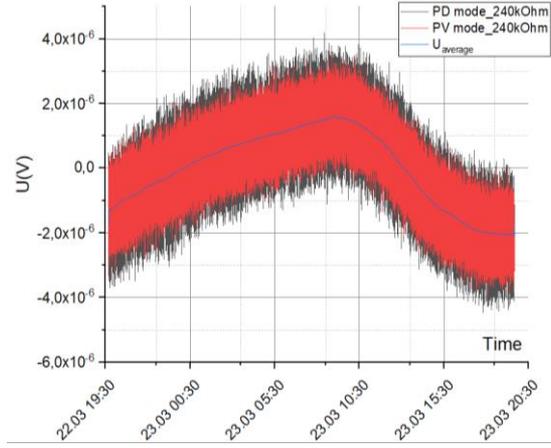
- 1) Результаты экспериментальных исследований, показывающие, что применение системы стабилизации мощности излучения для лазерного источника малогабаритного инклинометра при однодетекторной конфигурации позиционно-чувствительного устройства в случае регистрации инклинометром наклона с частотой $2 \cdot 10^{-4}$ Гц уменьшает амплитудный шум от нестабильности мощности излучения в среднем в 5 раз в частотном диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Гц, а в области частоты основного сигнала - в 2 раза.
- 2) Алгоритм цифрового регулятора для системы стабилизации мощности излучения с функциями программной термокомпенсации измерений датчика и автоматической коррекцией параметров регулятора на основе нечеткой логики, позволяющий улучшить относительный показатель суточной стабильности мощности маломощного лазерного источника в 43 раза.
- 3) Функциональные модели лазерного источника малогабаритного инклинометра и системы стабилизации, предназначенные для настройки и оптимизации параметров регулятора системы стабилизации.

Примеры близких работ по тематике стабилизации мощности излучения полупроводниковых лазеров

Название	Особенности	Достигнутая стабильность лазерной мощности	
Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator, 2018	ECDL laser (based on laser diode 895 nm/7mW), use of AOM with attenuator and generator, analog PI controller	RIN: 1kHz...100kHz $\rightarrow 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$ 100Hz $\rightarrow 4.46 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$ 1Hz $\rightarrow 2 \cdot 10^{-13} \text{ Hz}^{-1/2}$	Allan deviation: 100s (10^{-2} Hz) $\rightarrow 6 \cdot 10^{-7}$ 10000s (10^{-4} Hz) $\rightarrow 2 \cdot 10^{-6}$
Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, 2008	DFB fiber laser (1550nm, 10mW), use of AOM with driver	RIN: 1Hz $\rightarrow 6 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}^{-1/2}$ 1kHz $\rightarrow 4 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$	
Real-time and versatile laser-power stabilization with arbitrary amplitude modulation, 2019	ECDL laser (based on FP laser diode 795nm + ultra-low noise diode current source), use of AOM with driver, digital PID controller based on Arduino Nano (with internal DAC and ADC)	short-term stability (1 hour) $\rightarrow 0.16\%$ $P_{\text{average}} = 33.34 \mu\text{W}$	
A novel power stability drive system of semiconductor Laser Diode for high-precision measurement, 2019	Laser diode , laser driver with ADC and digital pot, digital neural network PI controller	$P_{\text{average}} = 493\text{mW}$ long-term stability (20–30h) $\rightarrow \pm 6\text{mW}$ ($\sim 2.4\%$) short-term stability (30–40min) $\rightarrow \pm 3\text{mW}$	
Design and Stability Analysis of a Digital Automatic Power Control Based on a PI Controller for Laser, 2023	Laser diode, (650nm, 3mW) , digital PI controller, laser driver with ADC and digital pot.	short-term stability(125min) $\rightarrow 3 \text{ mW}$ ($\pm 2\%$)	

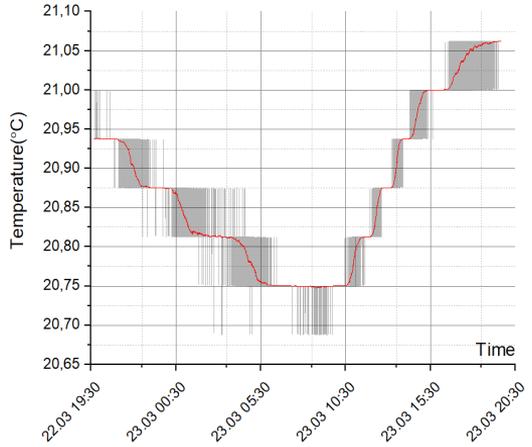
Параметры используемых фотодиодов

ФД	S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Тип	Si	Si	Si PIN	Si PIN
Емкость, пФ	13000	4000	24	130
Площадь фоточувствительной области, мм ²	100	33	13	324
Эквивалентная мощность шума, Вт/√Гц	$2.8 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^{-14}$	$6.6 \cdot 10^{-14}$
Темновой ток, нА	0.2нА	0.5нА	1	20
Макс.обратное напряжение, В	30	30	25	100



Сигнал на ФД S12915-1010R нагрузке 240кОм за 24 часа при вентилярном и фотодиодном режимах на сопротивлении (а) и изменение температуры внутри корпуса с экспериментальной установкой(б)

а)



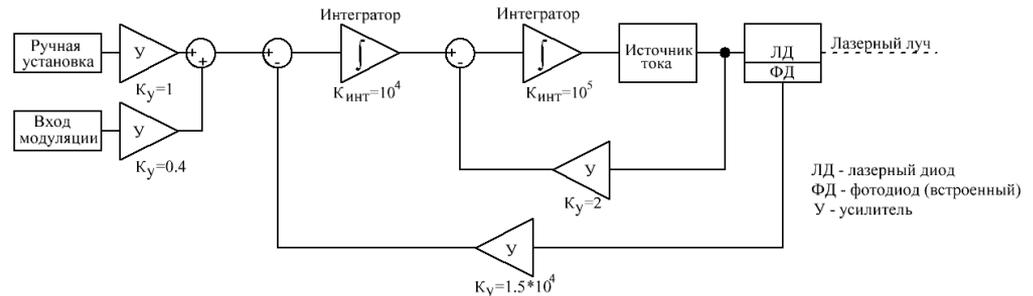
б)

Характеристики лазерного источника Thorlabs S1FC635



Длина волны излучения	мин. 630 нм
	тип. 635 нм
	макс. 640 нм
Полная выходная мощность	2.5 мВт
Стабильность мощности	15 мин.: ± 0.05 дБ; 24ч.: ± 0.1 дБ ($4.6 \cdot 10^{-2}$ в относит. показателе, после часа работы при температуре $25 \pm 10^\circ\text{C}$);
Тип оптоволокна	SM (одномодовое)
Класс лазера	3R
Разрешение уставки	0.01 мВт
Вход модуляции	0...5В, сопр-е 50 Ом
Полоса модуляции	5 кГц (при полной глубине модуляции)
	30 кГц (при малом сигнале)
Рабочая температура	$15^\circ\text{C} \dots 35^\circ\text{C}$

Упрощенная схема и функциональная модель лазерного источника



ЦАП DAC9881

Разрешение	18 бит
Кол-во каналов	1, single-ended
Питание	2.7В-5.5В(аналог.+цифр.) 1.25-5.5В(опорное)
Низкочастотный шум / дрейф	2мкВ (peak-to-peak, 0.1.....10Гц) 0.1ppm от полной шкалы (за 500 часов, $5.5 \cdot 10^{-7}$ Гц)
Температурный дрейф нуля	$\pm 0.25 \dots 0.8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ от полной шкалы
Температурный дрейф усиления	$\pm 0.25 \dots \pm 0.4 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Ошибка смещения нуля	$\pm 16 \dots \pm 32 \text{ LSB}$
Ошибка усиления	$\pm 16 \dots \pm 32 \text{ LSB}$
Дифференциальная нелинейность	$\pm 0.75 \dots \pm 2 \text{ LSB}$
Интегральная нелинейность	$\pm 0.1 \dots \pm 2 \text{ LSB}$
Особенности	Встроенный буфер, максимальный выходной ток 2.5мА, дифференциальный вход опорного напряжения с коррекцией

АЦП ADS255

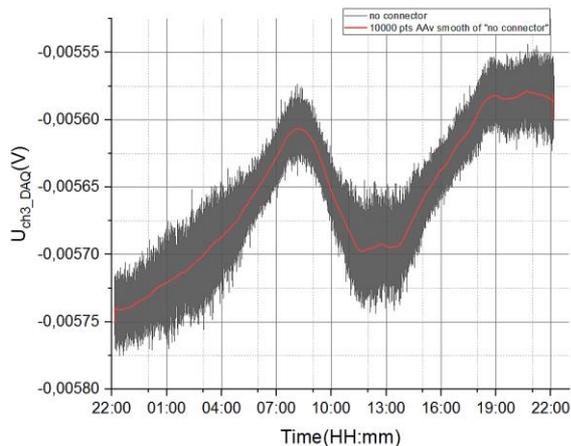
Разрешение	24 бит
Кол-во каналов	1 differential / 2 single-ended
Частота выборки	2.5SPS-30kSPS
Питание	4.75В-5.25 В (аналог.), 1.8В-3.6 В (цифр.), 0.5-2.5В (опор.)
Температурный дрейф нуля	$\pm 100 \text{ нВ}/^\circ\text{C}$ (при PGA=1) ; $\pm 4 \text{ нВ}/^\circ\text{C}$ (при PGA=64)
Температурный дрейф усиления	$\pm 0.8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Ошибка смещения нуля	0.247мкВ (rms, PGA=1, 2.5SPS) 0.033мкВ(rms, PGA=64, 2.5SPS)
Ошибка усиления	$\pm 0.005\%$ (при PGA=1) ; $\pm 0.03\%$ (при PGA=64)
Интегральная нелинейность	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$ FSR (при PGA=1) ; $\pm 7 \cdot 10^{-4}$ FSR (при PGA=64)
Особенности	PGA(1...64), встроенный буфер, цифровой фильтр, диф. вход опорного напряжения

ИОН REF5025

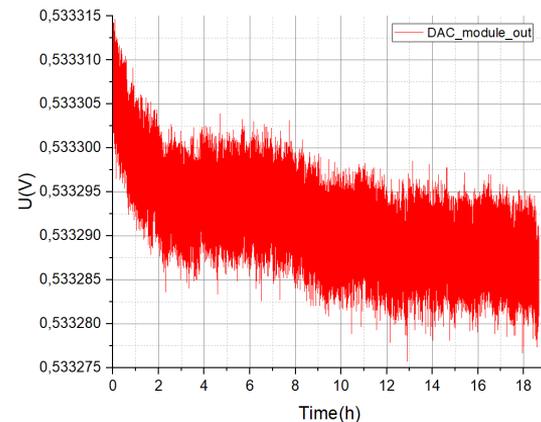
Output Voltage Noise, f = 0.1 Hz to 10 Hz	3μVPP/V
Output Voltage Temperature Drift	High-Grade, 2.5...3 ppm/°C
	Standard-Grade, 3...8 ppm/°C
LONG-TERM STABILITY	0 to 1000 hours, 100ppm/1000 hr
	1000 to 2000 hours, 50ppm/1000 hr



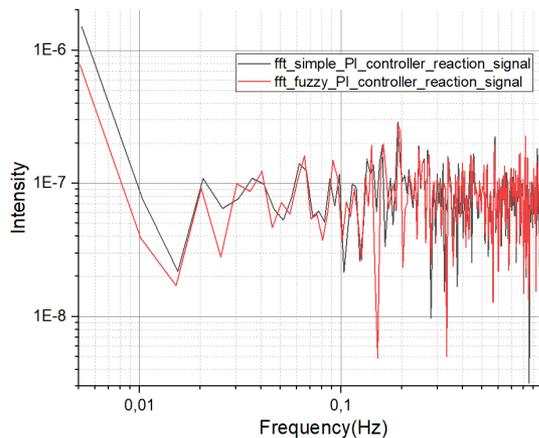
АЦП-модуль



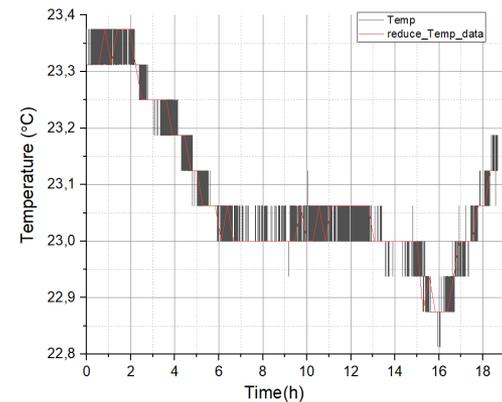
Сигнал с канала DAQ-системы без подключений (при одновременной работе ССМИ)



ЦАП-модуль



Спектры сигналов отклика на низкочастотное возмущение с ФД обратной связи ССМИ при стандартном регуляторе и регуляторе на основе нечеткой логики



Температурная зависимость ЦАП-модуля