

# Точность в ДЛС ФД+ПУ

---

*А.И.Надеждинский*

**DLS**  

---

**LAB**

*Отдел ДЛС  
Института общей физики им. А.М.Прохорова  
E-mail: Nad@nsc.gpi.ru*

# Введение

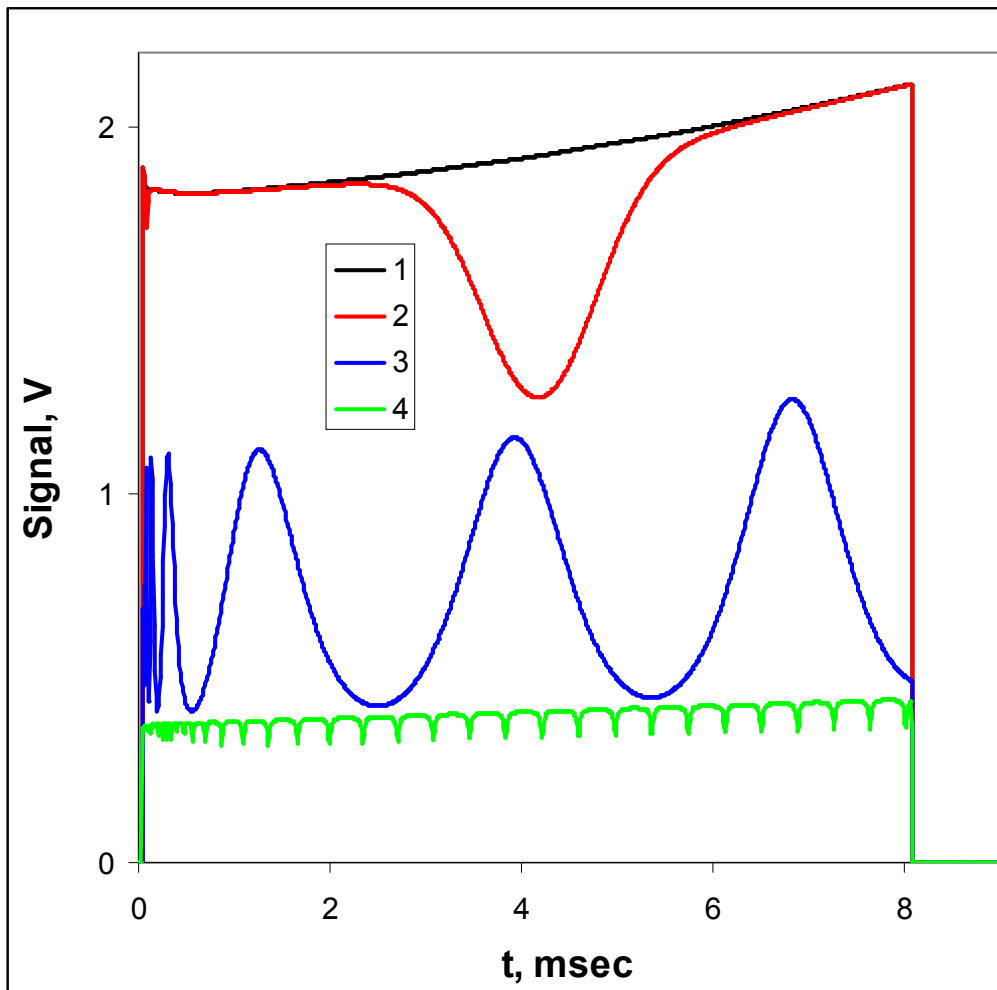
Повышение точности - сегодня одно из важнейших направлений ДЛС.

Зачем это нужно:

1. Возможность обнаружения и исследования новых физических явлений.
2. Высокоточное измерение спектроскопических параметров молекул для высокоточного моделирования их поглощения.
3. Некоторые аналитические применения требуют точности на уровне 0.1 – 0.01 %.

# Функционирование ДЛС

Режим работы: ДЛ возбуждается трапециевидным импульсом тока накачки. При этом происходит изменение интенсивности ДЛ и сканирование его частоты. В настоящее время регистрируются четыре сигнала.



1, 2 – сигналы без и с поглощением исследуемой молекулы, соответственно. Эти сигналы используются для определения молекулярного поглощения.

3, 4 – спектры пропускания калиброванного эталона ФП и кольцевого волоконного эталона, соответственно. Эти сигналы используются для калибровки частотной шкалы.

Регистрация всех сигналов и их обработка должны проводиться с максимально возможной точностью.

# Подсистемы ДЛС

С точки зрения точности, нас интересуют: точность измерения регистрируемого сигнала, точность определения частотной шкалы и искажения контура исследуемой линии.

В ДЛС есть шесть основных игроков:

1. Диодный лазер.
2. Фотоприемник + ПУ.
3. Молекула.
4. Оптика.
5. Электроника
6. Режим функционирования системы.

Каждый из этих игроков вносит свой вклад в искажения регистрируемого сигнала.

В настоящей работе мы рассмотрим один частный вопрос: нелинейность ФД+ПУ. В литературе этот аспект отсутствует.

# Оценка экспериментальной точности

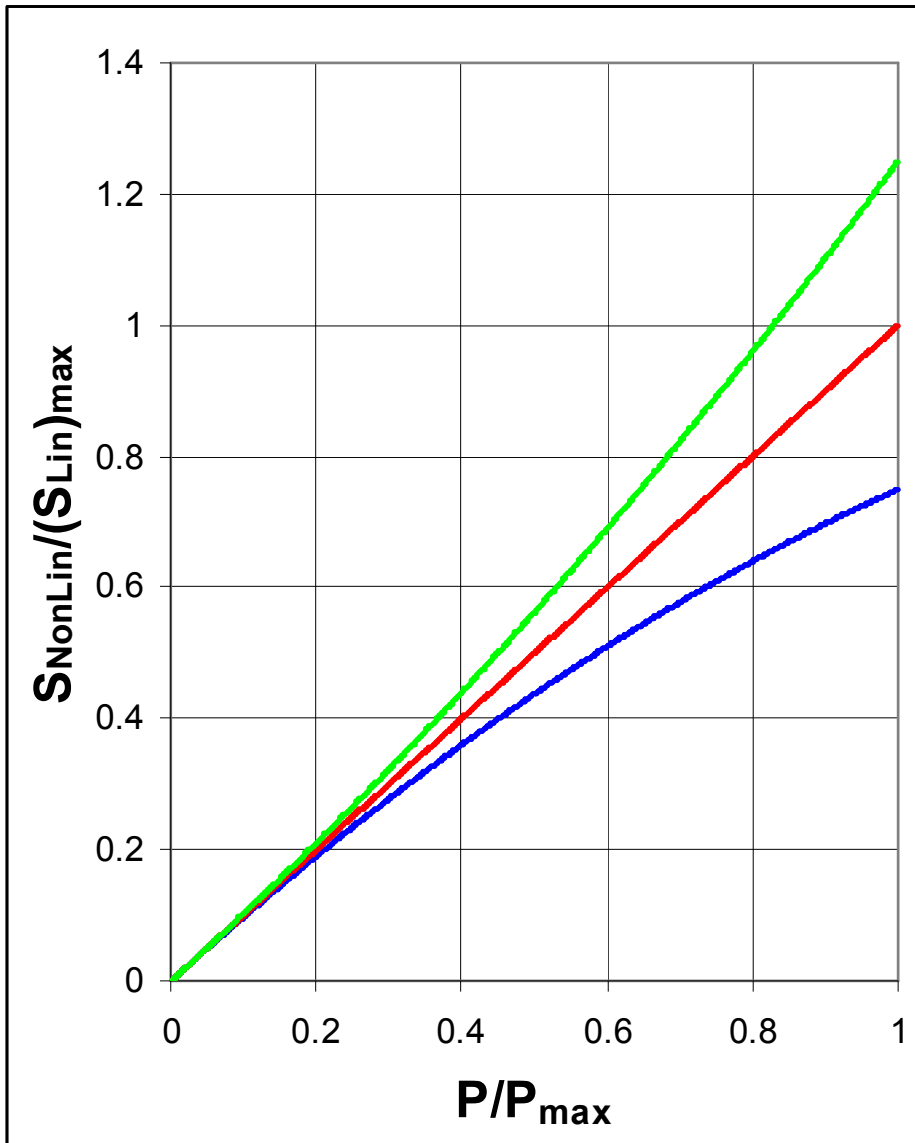
Пример оценки точности для одного из экспериментов

	Value	Error	Error %
L, cm	99.95	0.05	0.05
T, °C	20 - 25	0.2	0.07
P, mBar	0 - 100	0.07	0.07
CO <sub>2</sub> sample purity, %	99.98	0.02	0.02

**При внимательной постановки эксперимента возможно достижение абсолютной точности на уровне 0.1 %, которая в основном определяется погрешностью измерения длины кюветы, давления и температуры.**

**Следовательно, погрешность, определяемая нелинейностью, не должно превышать 0.01-0.1 %.**

# Нелинейность



Рассмотрим нелинейность ФД+ПУ.

В случае линейной регистрации, нормированный сигнал имеет линейную зависимость от нормированной мощности с единичным наклоном (красная прямая).

Нелинейность ФД+ПУ приводит к нелинейной зависимости регистрируемого сигнала от падающей на него мощности излучения (зеленая и синяя кривые).

Нелинейность может быть как положительной (зеленая кривая), так и отрицательной (синяя кривая)

# Нелинейность

Рассмотрим к чему приводит нелинейность при регистрации контура спектральной линии. На ФД падает излучение ДЛ, прошедшее кювету с исследуемым газом:

$$P(\nu) = P_0(\nu) \exp[-K_0(\nu)L]$$

Здесь  $P_0$  и  $P$  – интенсивность излучения ДЛ до и после кюветы, соответственно,  $K_0$  – истинный коэффициент поглощения исследуемой молекулы,  $L$  – длина кюветы. В случае нелинейности регистрируется сигнал:

$$S(\nu) = a_0 P(\nu) [1 + a_1 P(\nu) + a_2 P(\nu)^2 + \dots]$$

В случае слабой нелинейности можно ограничиться первыми двумя членами разложения. Исходя из полученных данных, находится absorbance:

$$K(\nu)L = -\ln\left[\frac{S(\nu)}{S_0(\nu)}\right] = K_0(\nu)L - \ln\left[\frac{1 + a_1 P_0(\nu) \exp[-K_0(\nu)L]}{1 + a_1 P_0(\nu)}\right]$$

Видно, что искажения, обусловленные нелинейностью, характеризуются величиной  $\text{NonLin} = a_1 * P_0(\nu)$  и контуром линии  $K_0(\nu)$

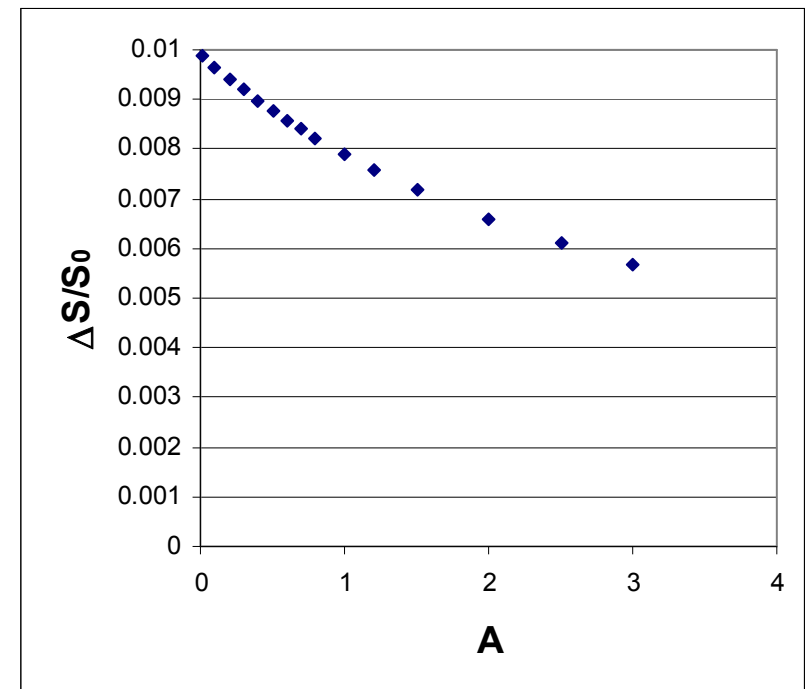
# Слабая нелинейность

Посмотрим, к каким искажениям параметров линии приводит нелинейность. В случае слабой нелинейности ( $a_1 P_0 \ll 1$ )

$$K(\nu)L = K_0(\nu)L + a_1 P_0(\nu) [1 - \exp(-K_0(\nu)L)]$$

Пусть  $P_0(\nu) = \text{const}$ , примем величину нелинейности  $\text{NonLin} = a_1 P_0 = 0.01 \ll 1$ . В качестве контура  $K_0 L$  примем контур Лоренца с амплитудой  $A$ .

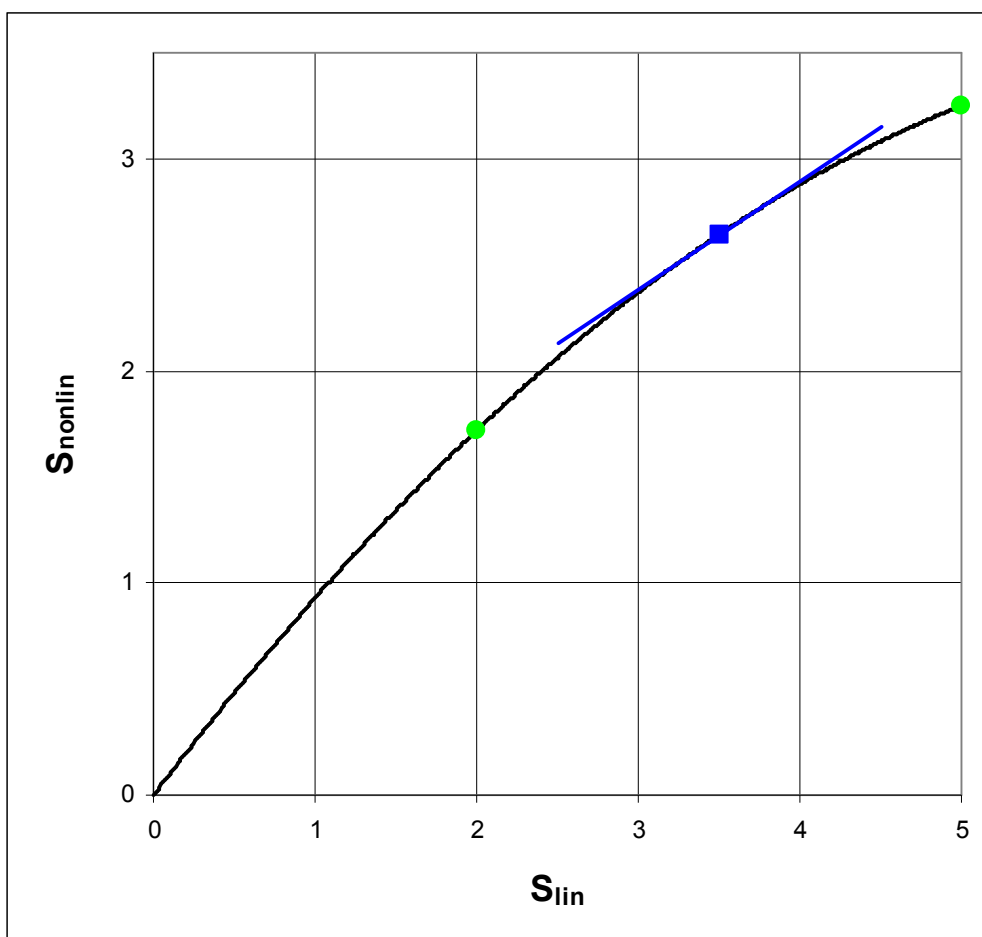
Зависимость обусловленной нелинейностью поправки к интегральной интенсивности от  $A$  - величины поглощения в центре линии. В данном случае интегральная интенсивность вычислялась напрямую (интеграл по спектру). Величина поправки при малых значениях поглощения -  $A$  равна величине нелинейности (в соответствии с моделью) и слабо изменяется с ростом  $A$ .





# Измерение нелинейности

В случае линейного отклика должна наблюдаться прямая с единичным наклоном. При наличии нелинейности отклик описывается нелинейной черной кривой. Для определения параметров нелинейности могут быть использованы три режима работы, для которых результаты могут быть сопоставлены с моделью нелинейности.



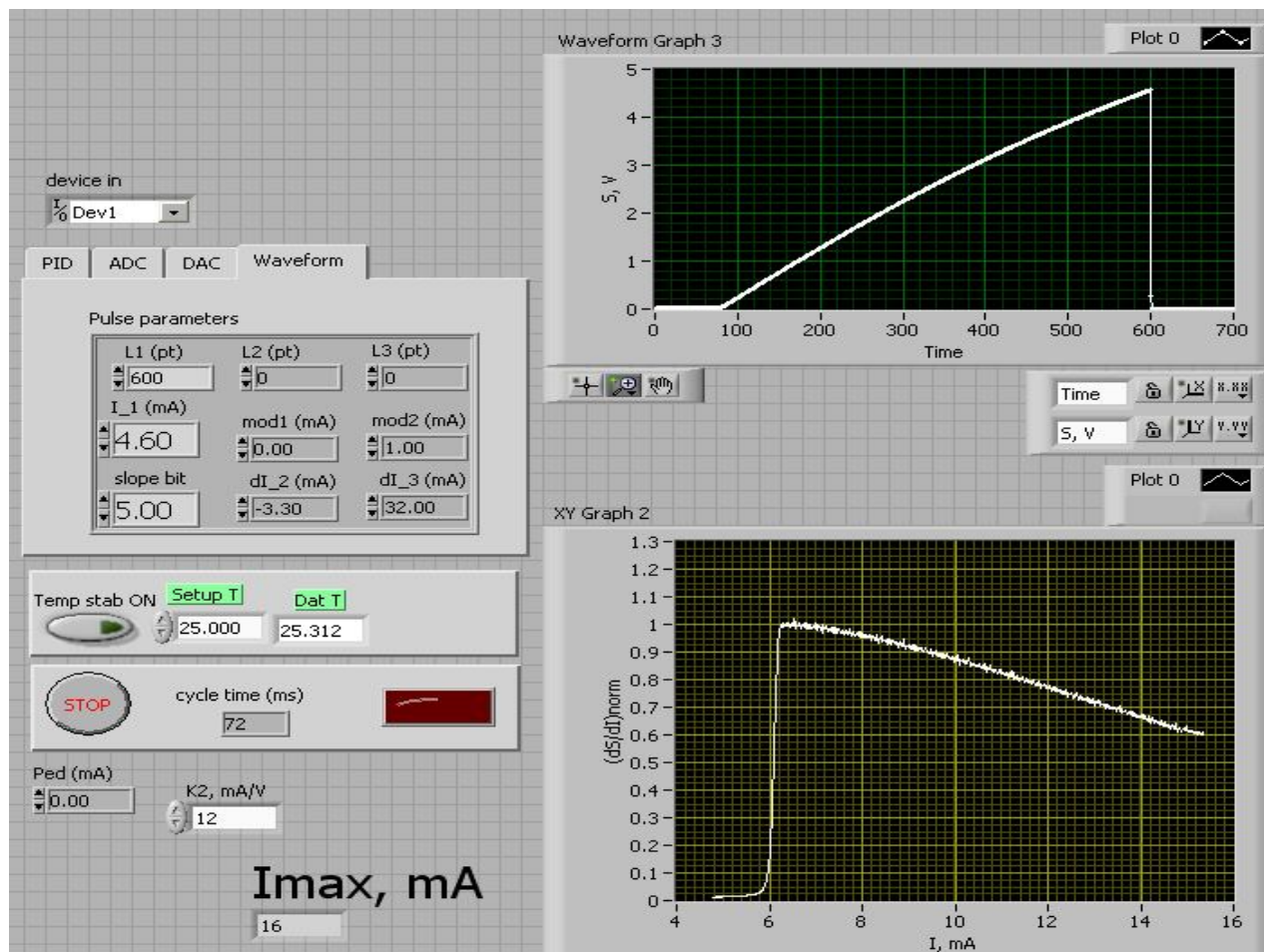
Режим №1 связан с регистрацией всей черной кривой.

Режим №2 (зеленые кружки) связан с измерением двух сигналов и определения их отношения, для двух интенсивностей ДЛ с фиксированным отношением. Величина самих интенсивностей может меняться.

Режим №3 (синий) - ФД освещается модулированным излучением ДЛ фиксированной амплитуды, а также излучением внешней подсветки, величина которой может меняться.

# Измерение нелинейности: режим №1

ДЛ возбуждается треугольным импульсом тока накачки. Измеряется зависимость сигнала от тока накачки (верхний график) и ее производная (нижний график).



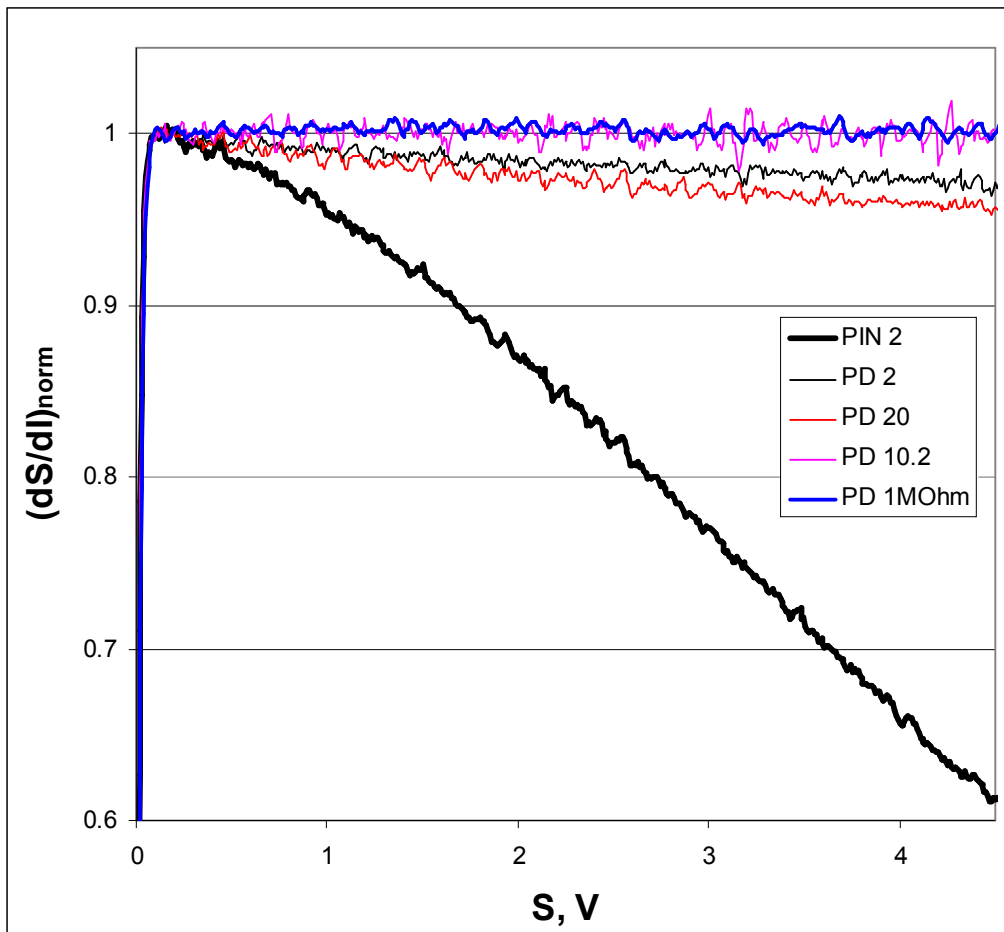
Пример измерения нелинейности PIN ФД, используемого для измерения перестройки с помощью кольцевого волоконного интерферометра.

Отчетливо видна нелинейность. В линейном случае нижний график должен иметь вид ступеньки с постоянной величиной производной выше порога.

# Режим №1

В случае режима №1 находилась нормализованная производная сигнала по току накачки

$$\left(\frac{\partial S}{\partial I}\right)_{norm} = \frac{\frac{\partial S}{\partial I}(P)}{\frac{\partial S}{\partial I}(0)} \left(\frac{\partial S}{\partial I}\right)_{norm} = 1 + 2a_1 P(v) + 3a_2 P(v)^2 + \dots$$



Результаты измерения нелинейности двух типов ФД и четырех типов ПУ.

Недостатки:

- точность определения нелинейности (1%) не достаточна для целей высокоточной спектроскопии.

- данный режим работы не позволяет разделить нелинейность ДЛ от нелинейности ПУ.

Достоинством режима №1 является его оперативность. Он позволяет разделить PIN и PD, а также две группы ПУ (старые и новые ???).

Разница между черными кривыми – нелинейность PIN ФД (ПУ одинаков).

# Терминология

Выше мы использовали термин PIN для идентификации одного из используемых ФД.

Следует отметить, что все используемые нами фотодиоды являются PIN фотодиодами. PIN описывает полупроводниковый переход, состоящий из трех областей с разными типами проводимости: P – дырочная, I – собственная, N – электронная.

В ДЛС обычно используются фотодиоды диаметром 1 – 4 мм.

ФД, который мы называем PIN, предназначен для работы в линиях оптической связи. Это означает работу на очень высоких частотах. Это требует очень низкой емкости ФД. Для достижения малой емкости используют ФД малой площади (диаметр порядка 50 мкм). Для эффективного сопряжения этих ФД с волокном в модуль ФД включен коллиматор.

По этой причине при одинаковом фототоке плотность излучения на поверхности “PIN” ФД на много порядков больше по сравнению с обычным ФД. Это проявляется в большой величине нелинейности данного типа ФД.

# ФОТОДИОД

Функционирование фотодиода описывается следующим скоростным уравнением.

Здесь  $n$  – концентрация неравновесных носителей,  $G$  – скорость генерации неравновесных носителей,  $P$  – падающая на ФД мощность излучения,  $S$  – площадь ФД,  $b$  – толщина, в которой поглощается излучение,  $\eta$  – квантовая эффективность ФД,  $\tau$  – время жизни неравновесных носителей.

Поскольку квантовая эффективность ФД близка к 1, то  $\tau$  есть время, за которое носители покидают область, в которой происходит их генерация.

Поэтому  $nSb/\tau$  есть фототок -  $i$ . Кубический по  $n$  член описывает трехчастичную Оже рекомбинацию, при которой электрон и дырка рекомбинируют, а третья частица уносит выделившуюся энергию. Т.е. в стационарном случае скорость генерации неравновесных носителей и фототок связаны соотношением:

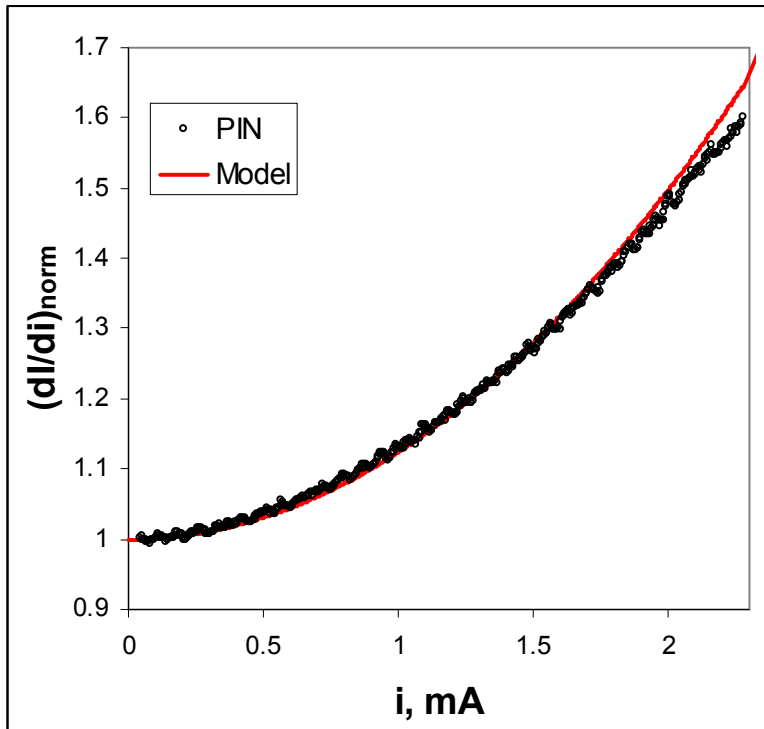
$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{n}{\tau} - An^3$$

$$G = \frac{\eta P}{\hbar\omega} \frac{1}{Sb}$$

$$\frac{\eta P}{\hbar\omega} = i + ASb \left( \frac{i\tau}{Sb} \right)^3$$

$$\left( \frac{\partial I}{\partial i} \right)_{norm} = 1 + 3 \frac{A\tau^3}{b^2} \left( \frac{i}{S} \right)^2$$

# Оже рекомбинация



Зависимость нелинейности PIN ФД от величины фототока. Видно, что нелинейность PIN ФД описывается следующим выражением (красная кривая), обусловленным Оже рекомбинацией.

$$\left( \frac{\partial I}{\partial i} \right)_{norm} = 1 + 3 \frac{A\tau^3}{b^2} \left( \frac{i}{S} \right)^2$$

Оценка нелинейности при величине сигнала 5 В для двух ФД и четырех ПУ.

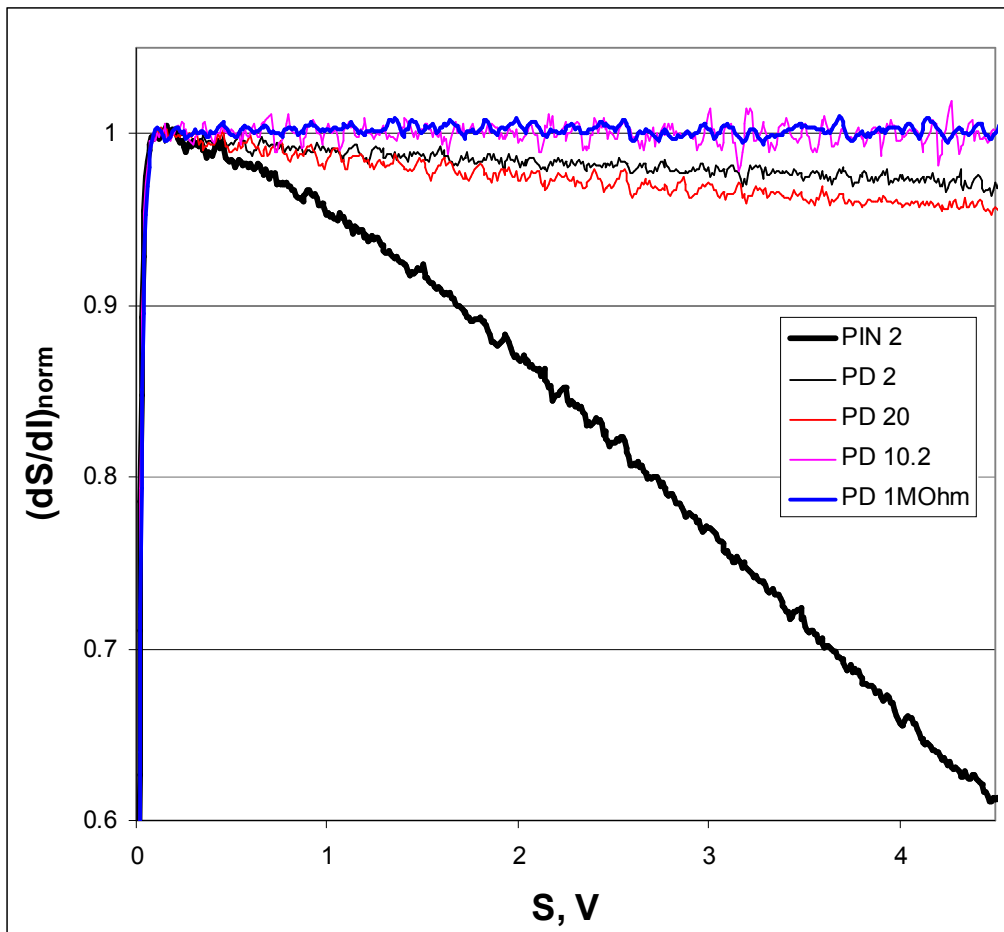
	PIN	PD	PD	PD	PD
d, mm	0.1	1	1	1	1
2R, kOhm	2	2	20	10.2	1000
i(5V), mA	2.5	2.5	0.25	0.49	0.005
NL(5V)	0.6	6.00E-05	6.00E-07	2.31E-06	2.40E-10

Видно, что нелинейность обычного ФД ( $d = 1$  мм) пренебрежимо мала. Для PIN ФД необходимо значительно уменьшить фототок (в 100 раз).

# Нелинейность ПУ

В случае режима №1 находилась нормализованная производная сигнала по току

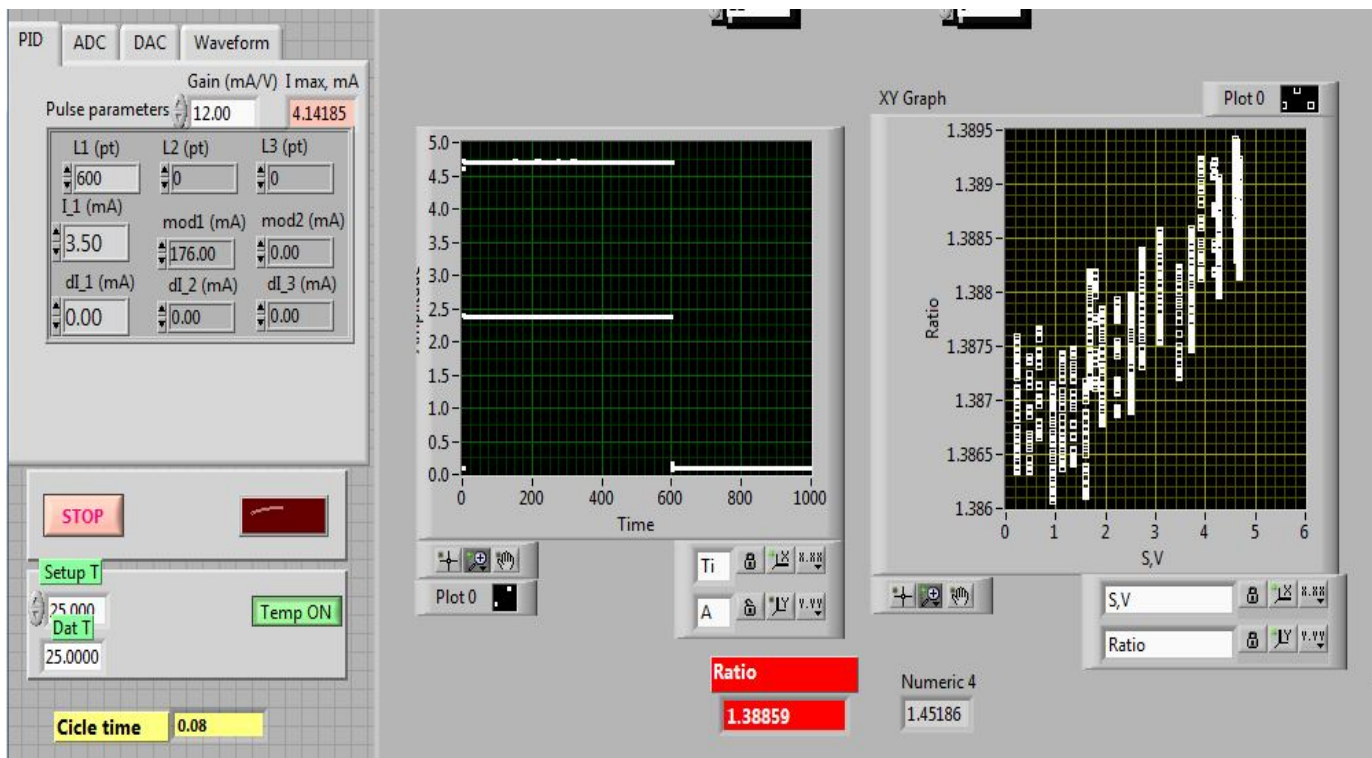
$$\left(\frac{\partial S}{\partial I}\right)_{norm} = \frac{\frac{\partial S}{\partial I}(P)}{\frac{\partial S}{\partial I}(0)} \quad \left(\frac{\partial S}{\partial I}\right)_{norm} = 1 + 2a_1P(v) + 3a_2P(v)^2 + \dots$$



Результаты измерения нелинейности двух типов ФД и четырех типов ПУ. В соответствии с проведенным выше рассмотрением за исключением PIN ФД наблюдаемая нелинейность обусловлена нелинейностью ПУ. Однако, точность измерения нелинейности в случае режима №1 недостаточна. Для более точного измерения нелинейности использовались режимы №2 и №3.

# Режим №2

Режим №2 связан с измерением двух сигналов и определения их отношения, для двух интенсивностей ДЛ с фиксированным отношением. Изменяя расстояние между выходом излучения ДЛ и ФД изменялась доля излучения, попадавшего на ФД.



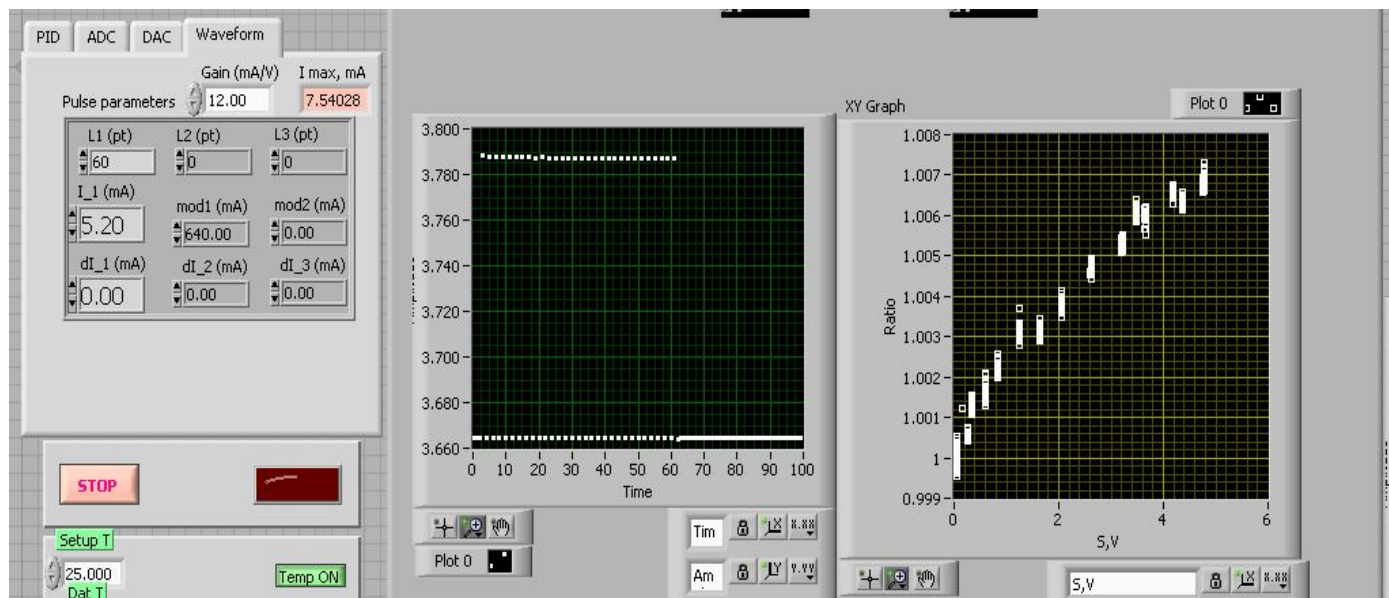
Измерение нелинейности ФД (1 мм) + ПУ (1 Мом). Здесь проблемой точности являлась спекл картина, обусловленная оболочечными модами волокна. Поэтому ДЛ работал ниже порога, где имеет место спонтанное широкополосное излучение.

Для данного ФД+ПУ регистрируемый сигнал достаточно велик даже при работе ДЛ значительно ниже порога. Максимальный ток был 4.1 мА при пороге 7 мА. Видно заметное улучшение отношения N/S (0.05 %). Для применения этого режима для других ФД+ПУ необходимо использование мощных LED.



# Режим №3

Режим №3 - ФД освещается модулированным излучением ДЛ фиксированной амплитуды, а также излучением внешней подсветки, величина которой может меняться.



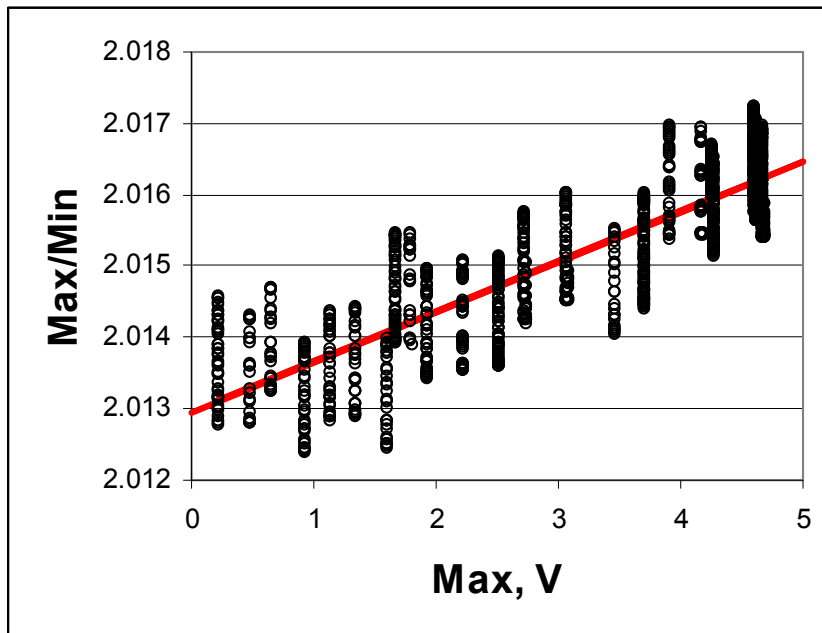
Измерение нелинейности ФД (1 мм) + ПУ (1 Мом).

Подсветка осуществлялась электрическим фонариком.

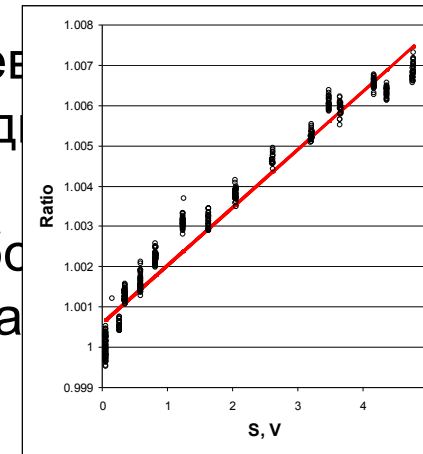
Видно значительное улучшение отношения N/S до уровня 0.01 %, что уже соответствует требованиям измерения нелинейности для высокоточной ДЛС. Проблема здесь была связана с тем обстоятельством, что часть излучения ДЛ отражалась поверхностью ФД и рефлектором фонарика опять направлялось на ФД. Поэтому для каждой установки фонарика регистрировались два значения модуляции при выключенном и включенном фонарике и находилось их отношение.

# Измерение нелинейности ПУ

Для измерения нелинейности ПУ использовались режимы №2 и №3. Измерение нелинейности ПУ (1 Мом).



Режимы №2 (слева) и №3 (справа). Видно наличие нелинейностей более высокого порядка.



$$\frac{Max}{Min} = \alpha + a_1(\alpha - 1)Max$$

$$a_1 = 0.00034 \frac{1}{V}$$

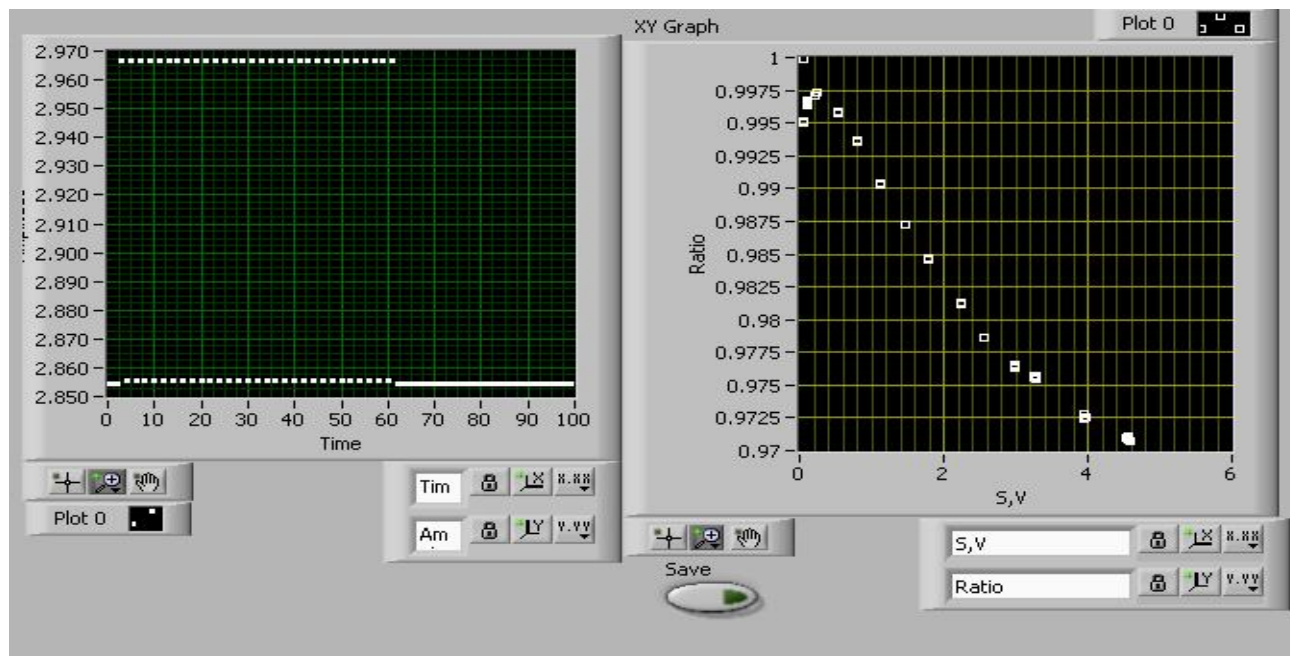
В случае квадратичной нелинейности:

$$Ratio = \frac{Mod(S)}{Mod(0)} = 1 + 2a_1S$$

$$a_1 = 0.00036 \frac{1}{V}$$

Оба режима дают согласованные значения нелинейности. Режим №3 более точен, но более трудоемок. Измеренная величина нелинейности данного ПУ приведет к погрешности измерения интегральной интенсивности линии 0.18 %.

# Новый ПУ

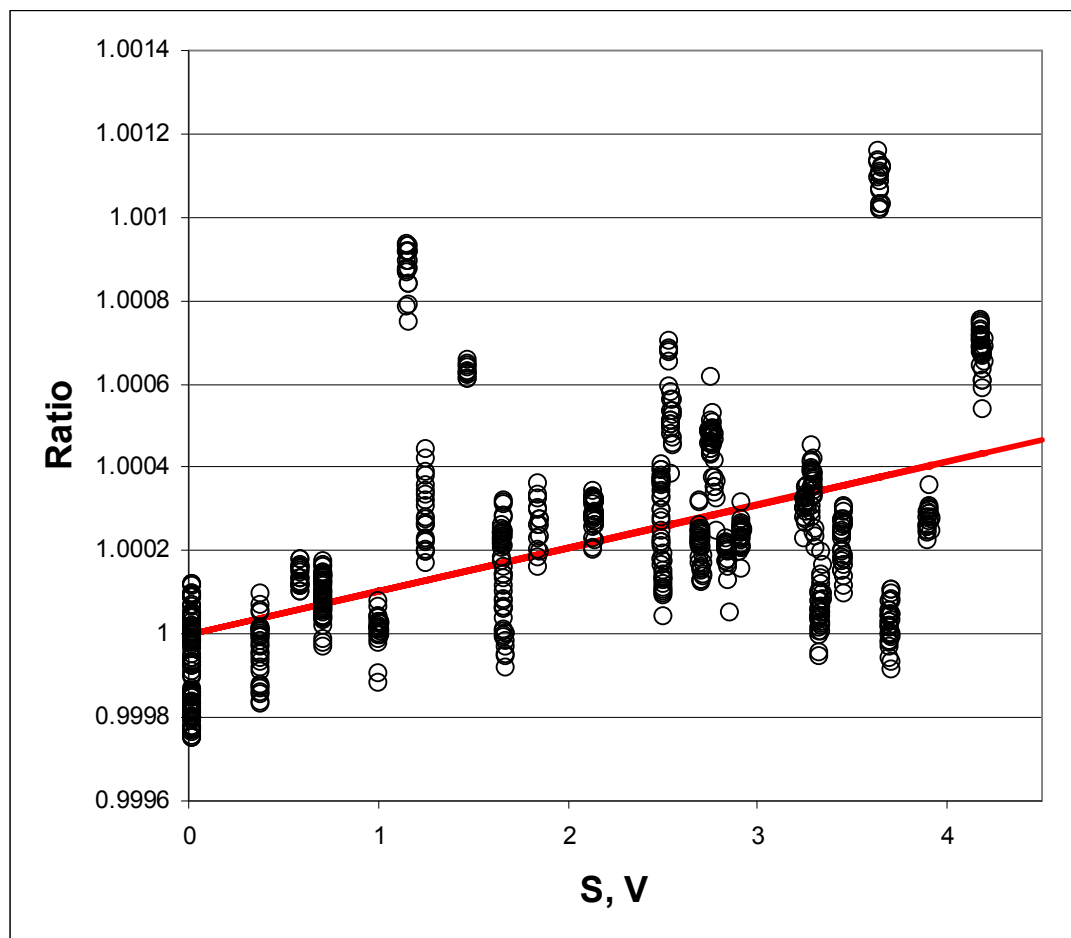


Измерение нелинейности одного из новых ПУ при использовании режима №3. Видно сложное поведение нелинейности от сигнала  $S$  и огромная величина этой нелинейности, что приведет к ошибке интегральной интенсивности на уровне 3 %.

Кроме того, поведение нелинейности в области малых сигналов сильно зависит от частоты. Провал исчезает лишь для частот  $\sim 10$  кГц. Эта нелинейность похожа для всех исследованных новых ПУ. Возможно, она связана с использованной в этих ПУ интегральной схемой.

**Вывод: новые ПУ не могут быть использованы в высокоточной ДЛС, пока источник нелинейности не будет идентифицирован и устранен.**

# ПУ для спектрометра



Измерение нелинейности ФП для спектрометра ( $R = 10.2$  кОм,  $V \sim 1$  МГц) с помощью режима №3. Данная процедура измерения является достаточно сложной. Не всегда удается сохранить положение фонарика до и после включения. Это объясняет наличие выпадающих из общего тренда измерений. Величина нелинейности:

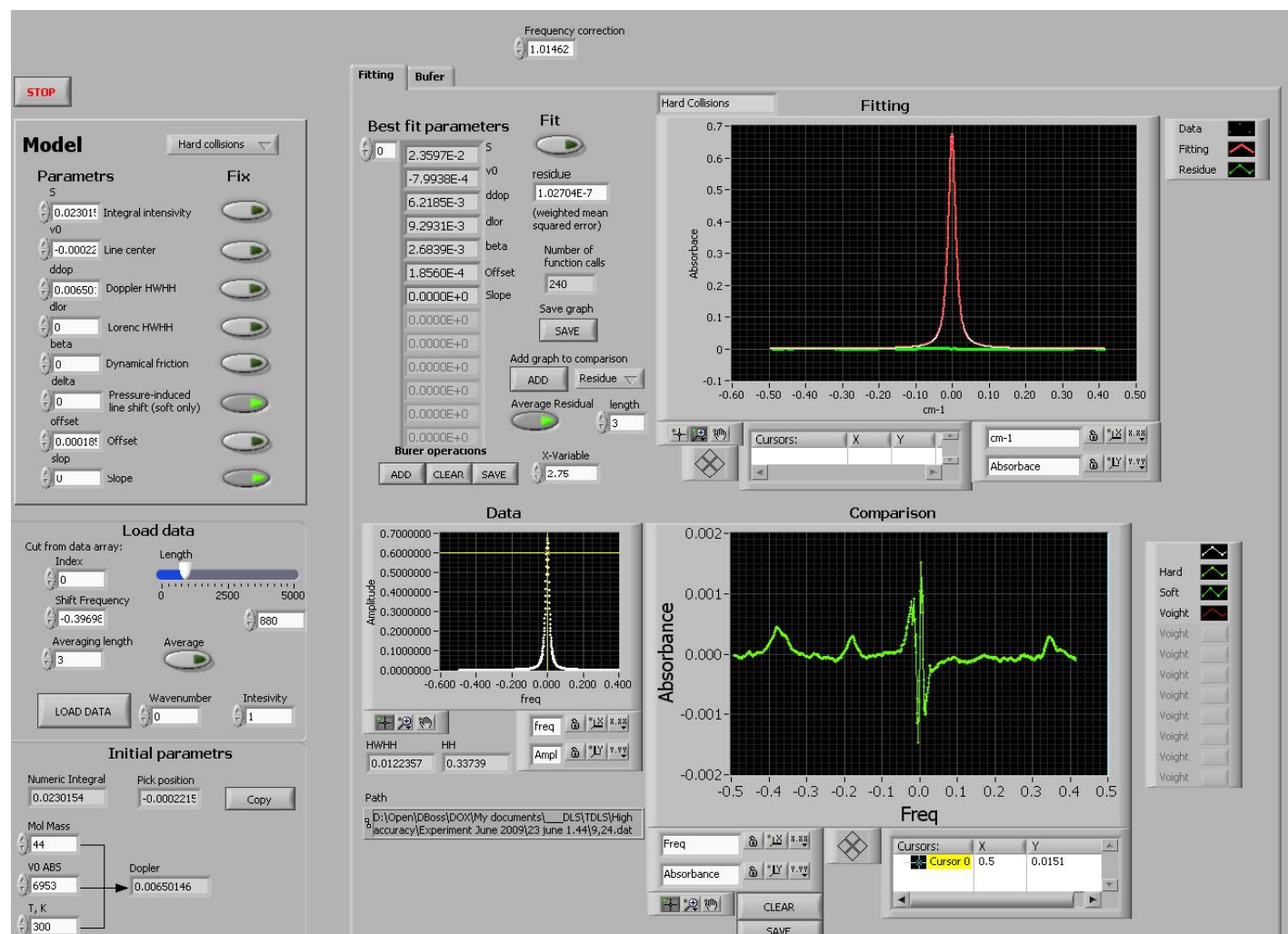
$$Ratio = \frac{Mod(S)}{Mod(0)} = 1 + 2a_1S$$

$$a_1 = 0.000026 \frac{1}{V}$$

Данная величина нелинейности ПУ приведет к погрешности определения интенсивности линии на уровне 0.013 %, что соответствует требованиям высокоточных измерений в ДЛС. Именно этот ФД+ПУ будет использован в высокоточном ДЛ спектрометре.

# Подгонка

Для определения параметров линии с учетом нелинейности использовалась программа подгонки спектров.

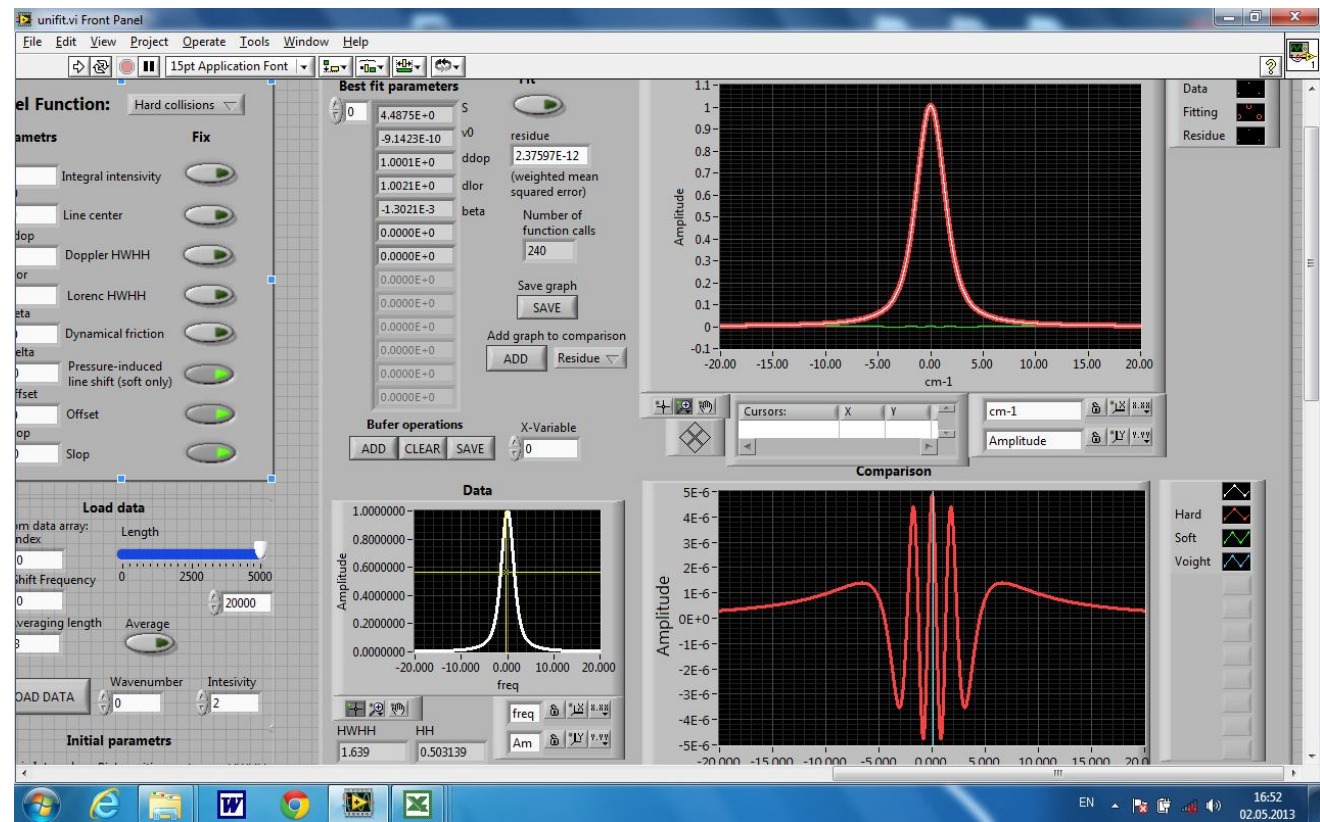


Программа обеспечивает подгонку экспериментальных спектров (в данном случае анализировалась линия CO<sub>2</sub> при давлении 92.4 мБар) контурами soft и hard. Подгоночными параметрами являются: S - интегральная интенсивность, v0 – центр линии, ddop – ширина Доплера, dlcr – ширина Лоренца, beta – параметр сужения, offset и slop – базовая линия и ее наклон, соответственно. Кроме того, определяется величина нормализованной асимметрии (~ 10<sup>-3</sup>)

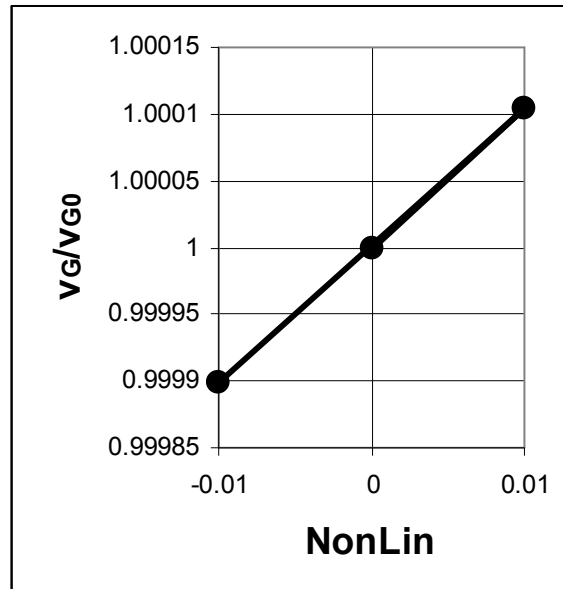
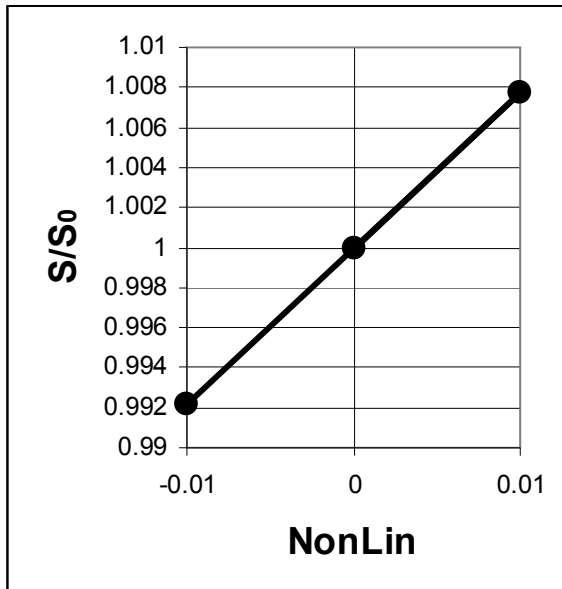
# Моделирование нелинейности

Для моделирования влияния нелинейности на параметры контура линии был создан контур Фойгта с ширинами Гаусса и Лоренца, равными 1, и амплитудой в центре линии – 1. Затем был найден контур с учетом нелинейности – NonLin. Затем была проведена подгонка с помощью контура Hard.

Подгонка контура для величины NonLin = 0.01. Видно, что невязка находится на уровне  $5 \cdot 10^{-6}$ . Эта величина находится далеко за пределами точности эксперимента.



# Результаты моделирования



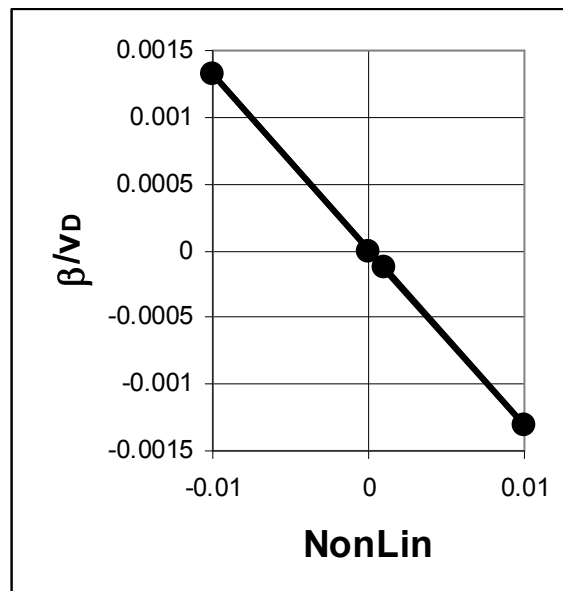
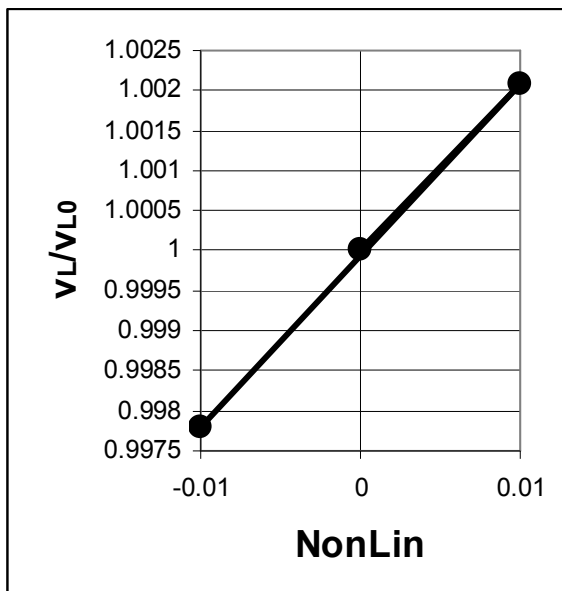
Зависимость параметров подгонки от величины нелинейности  $NonLin$ . Видно, что для малой величины нелинейности все параметры линейно зависят от величины  $NonLin$ .

$$\frac{\Delta S}{S_0} \approx NonLin$$

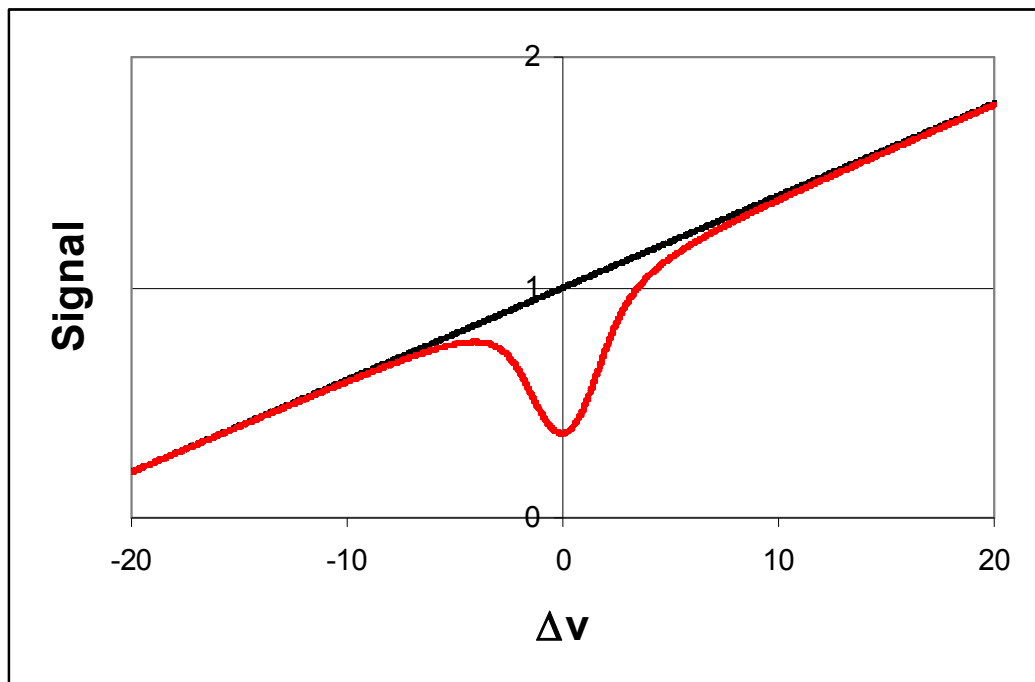
$$\frac{\Delta v_G}{v_{G0}} \approx 0.01 * NonLin$$

$$\frac{\Delta v_L}{v_{L0}} \approx 0.2 * NonLin$$

$$\frac{\beta}{v_{G0}} \approx -0.13 * NonLin$$

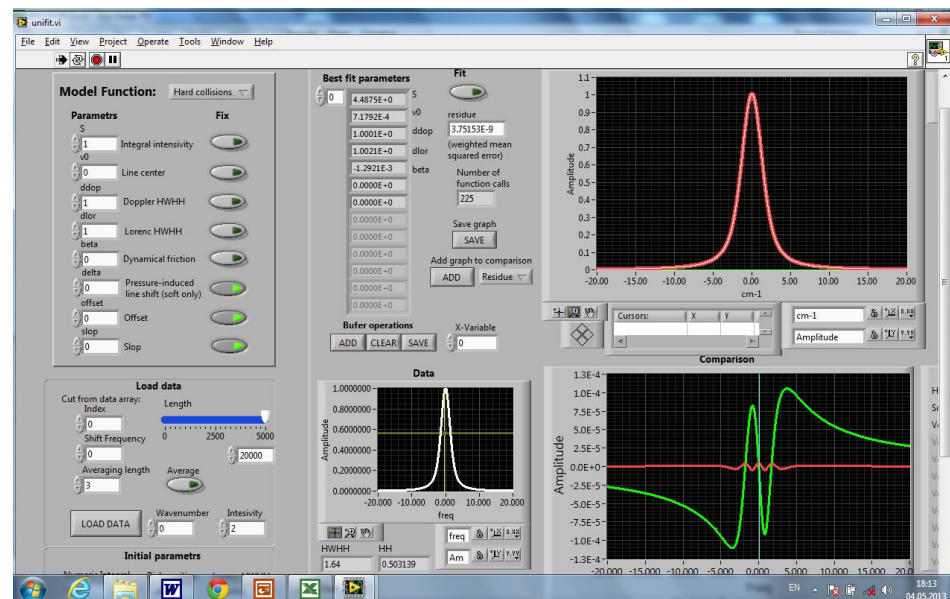


# Асимметрия



Выше мы рассмотрели ситуацию постоянной интенсивности. В ДЛС это не так. Типичная форма сигналов при регистрации линии поглощения в ДЛС. В подгонке видно появление асимметрии, которая составляет  $10^{-4}$  для  $\text{NonLin} = 0.01$ . Данная асимметрия на порядок меньше наблюдаемой асимметрии  $\sim 10^{-3}$  спектральных линий.

Обнаружен обусловленный нелинейностью сдвиг  $\Delta v/v_L \sim 7 \cdot 10^{-4}$ . Этот сдвиг может привести к ряду паразитных эффектов: искажение величины сдвига линии давлением, искажение разности частот между линиями, искажение частотной перестройки ДЛ.





# Роль нелинейности

Рассмотрим вклад нелинейности при определении параметров спектральной линии. В таблице приведена зависимость параметров от нелинейности, реализованная погрешность их определения и величина NonLin, при которой нелинейность играет заметную роль при определении параметра спектральной линии.

	Value	RelEr, %	Max NonLin, %
$(\Delta S/S_0)/\text{NonLin}$	1	0.05	0.05
$(\Delta v_G/v_{G0})/\text{NonLin}$	0.01	0.1	10
$(\Delta v_L/v_{L0})/\text{NonLin}$	0.2	0.1	0.5
$(\Delta\beta/v_{G0})/\text{NonLin}$	-0.13	3	23
$(\Delta v/v_{L0})/\text{NonLin}$	0.07	0.015	0.2
Asimmetry/NonLin	0.01	5	0.5

Для NonLin = 0.013% (ФД+ПУ для спектрометра) нелинейность не играет заметной роли при определении параметров исследуемой линии. Для NonLin = 0.1% нелинейность искажает значение интегральной интенсивности. Для NonLin = 1% нелинейность искажает также данные для положения линии, ее асимметрии и уширения Лоренца. Уширение Доплера и коэффициент сужения не чувствительны к нелинейности.

# Нелинейность

Вообще говоря, нелинейность не является катастрофой. Нужно измерить зависимость сигнала от мощности, как это было сделано выше

$$S(\nu) = a_0 P(\nu) \left[ 1 + a_1 P(\nu) + a_2 P(\nu)^2 + \dots \right]$$

и внести соответствующую коррекцию в сигнал.

Это было бы так, если бы не наличие нелинейного процесса получения сигнала. Регистрируемый сигнал есть свертка истинного сигнала с аппаратной функцией спектрометра. Аппаратная функция спектрометра есть свертка аппаратной функции ДЛ и аппаратной функции ФД+ПУ.

Аппаратная функция ДЛ существует всегда – это есть контур Лоренца. Здесь описанный выше алгоритм компенсации нелинейности не работает и требуется использование ФД+ПУ с минимально возможной нелинейностью.

Аппаратная функция ФД+ПУ подлежит анализу и оптимизации.

# Выводы

Требования конкретной задачи ДЛС требуют оптимизации параметров ФД+ПУ. В ДЛС ФД не играет заметной роли, поэтому оптимизации подлежат параметры ПУ: коэффициент обратной связи, полоса, нелинейность.

Высокоточные измерения: необходимы минимальная нелинейность и широкая полоса. В настоящее время этим условиям удовлетворяет ПУ для спектрометра:  $2R = 10.2$  кОм, полоса  $\sim 1$  МГц (полоса АЦП NI DAQ), нелинейность - 0.013 %, который не приводит к значимым искажениям регистрируемого сигнала.

Регистрация малого поглощения: необходима оптимизация коэффициента обратной связи и полосы. В настоящее время этим условиям удовлетворяет ПУ:  $2R = 20$  кОм, полоса 200 кГц, который обеспечивает регистрацию минимального резонансного поглощения.

Регистрация малого сигнала: необходима оптимизация коэффициента обратной связи и полосы. В настоящее время этим условиям в наибольшей степени удовлетворяет ПУ:  $2R = 2$  МОм, полоса 68 кГц, который обеспечивает регистрацию дробовых шумов фототока.