

***Лицей «Физико-техническая школа»
имени Ж.И. Алфёрова
Санкт-Петербургского Академического университета***

Отчёт о практике

***Разработка прибора для высокоточного измерения
фазовых блужданий «Wander» сигналов системы
тактовой сетевой синхронизации в цифровых сетях***

Работу выполнил:

ученик 11 класса Латыпов Владимир Витальевич

Научные руководители:

к.т.н., Генеральный директор ОАО «НТП «КОМЕТЕХ» Сторожук Николай Леонидович,

к.т.н., с.н.с., начальник отдела ОАО «НТП «КОМЕТЕХ» Воробьёв Александр Сергеевич

Место прохождения практики:

ОАО «НТП «КОМЕТЕХ» и дистанционно

АННОТАЦИЯ

Данная работа относится к разработке прибора для измерения блуждания фазы и нестабильности частоты в аппаратуре связи и тактовой сетевой синхронизации, выпускных испытаний, а также проведения аудита цифровых сетей связи и эксплуатационных измерений параметров каналов и соединительных линий, в том числе и в полевых условиях.

Под блужданием фазы (Wander) понимаются медленные изменения значащих моментов цифрового сигнала относительно их эталонных положений во времени (данное понятие относится к изменениям, следующим с частотой ниже 10 Тц). Они образуются вследствие передачи сигнала на большие расстояния, прохождения его через регенераторы, мультиплексоры и прочие устройства в сетях тактовой синхронизации.

Измеритель временных отклонений применяется к следующим приборам:

- ПЭТ – первичный эталонный генератор,*
- ВЗТ – вторичный задающий генератор,*
- МЗТ – местный задающий генератор*

Известный отечественный и зарубежные аналоги представляют собой довольно громоздкие и тяжелые приборы (Фиг. 1-3), возить которые по узлам связи для проведения испытаний представляет определенные трудности, особенно, учитывая большое количество узлов связи и протяженность по всей России сетей связи. А закупать отдельные приборы для каждого узла связи экономически нецелесообразно.



ИВО-2М (Россия)



OSA-5565 (Швейцария)



ANT-20 (Германия)

Кроме того, известные аналоги имеют всего 1-2 канала измерения, что недостаточно для массового выпуска аппаратуры из-за большого разнообразия испытаний и длительности каждого испытания.

Учитывая ускорившееся развитие цифровых сетей связи, увеличение объёмов передачи информации по ним и возникшую массовую необходимость замены из-за заканчивающегося срока службы аппаратуры тактовой сетевой синхронизации, а также необходимость снижения весов и габаритов измерителей, стала особенно актуальной задача разработки нового измерителя, отвечающего этим требованиям.

В связи с этим поставлена задача разработки измерителя фазовых блужданий, имеющего четыре канала измерения с уменьшением объема прибора в 25 раз и веса в 10 раз по отношению к отечественному аналогу ИВО-2М при снижении вдвое дискретности измерения фазы.

Содержание

<i>АННОТАЦИЯ</i>	2
<i>Содержание</i>	4
<i>Введение</i>	5
<i>Постановка задачи</i>	6
<i>Методика</i>	9
<i>Полученные результаты и выводы</i>	27
<i>Список используемых источников</i>	28
<i>Ссылки (References)</i>	28
<i>Благодарности</i>	29

Введение

Разрабатываемый Измеритель фазовых блужданий четырехканальный (ИФБ-4) предназначен для измерения параметров нестабильности частоты и дрейфа фазы в аппаратуре связи и в устройствах тактовой сетевой синхронизации одновременно по четырем каналам на этапах разработки, выпускных испытаний и эксплуатации устройств ТСС.

Результаты измерений выводятся на экране монитора в режиме реального времени в виде до четырех графиков относительной ошибки временного интервала (ОВИ) измеряемых сигналов частотой 2048 кГц относительно эталонной частоты 10 МГц, а также текущих числовых значений максимальных ошибок временного интервала (МОВИ) и относительных нестабильностей $\frac{\Delta f}{f}$ соответствующих каналов. На графиках отображаются также условия, длительность и параметры измерений. По окончании измерений результаты записываются в файл для просмотра, документирования и дальнейшей обработки.

Кроме того, по результатам измерения ОВИ вычисляются и отображаются в логарифмическом масштабе по обеим осям графики МОВИ и девиации временного интервала (ДВИ), а также отображаются выбираемые из каталога соответствующие маски допустимых значений МОВИ и ДВИ для сравнения с ними полученных результатов.

Для тестирования аппаратуры связи и тактовой сетевой синхронизации ИФБ-4 формирует и выдает по четырем каналам имитационные сигналы с нормированными параметрами по заданному отклонению $\frac{\Delta f}{f}$ относительно эталонной частоты, а также частоты и амплитуды изменения фазы по синусоидальному закону.

Постановка задачи

Прибор-измеритель фазовых блужданий должен состоять из 2-х частей физически: компактный блок-устройство для измерения данных и передачи на компьютер и компьютерная программа для обработки и отображения результатов с возможностью интеракции с этими результатами для детального изучения экспертами.

Логически же устройство делится на «имитатор» и «измеритель».

Задача имитатора – подавать на сглаживающее (измеряемое) устройство тестовый сигнал, то есть меандр со сдвигом по фазе, зависящим от времени регламентированным образом. Для тестирования используется два разных вида законов изменения фазового отклонения: линейный и синусоидальный, параметры этих кривых конфигурируемы, далее на экране должен быть выведен график сгенерированного сигнала для тестирования, то есть данные, посылаемые на имитатор, и график, представляющий собой отображение данных полученных измерителем, который представляет собой динамику фазового сдвига на выходе сглаживателя и характеризует качество работы этого измеряемого устройства.

Основные электрические требования

Прибор выполняет функции измерителя и имитатора

Имитатор

- **Одновременно выдаёт по четырем каналам тестовые сигналы частотой 2048 кГц (Рек.МСЭ-ТГ.703 п.10) при сопротивлении нагрузки 120 Ом.**
- **Обеспечивает изменение фазы выходных сигналов относительно эталонного сигнала**
 - **по линейному закону в диапазоне относительного отклонения частоты от $\pm 1 \times 10^{-12}$ до $\pm 5 \times 10^{-6}$ отн. ед. с шагом не более 1×10^{-13} .**
 - **по синусоидальному закону с модуляцией фазы частотой от $f = 1 \times 10^{-7}$ Гц до $f = 20$ Гц до с амплитудой модуляции от 10 наносекунд до 2500 наносекунд.**
- **При включении прибора без компьютера сигналы на всех выходах синхронны с опорным сигналом 10 МГц**
- **требует применения внешнего рубидиевого стандарта (TSR- 37), а для более точного измерения использования цезиевого (FN-GPS/R Standard Frequency) или водородного стандартов к тем же входам**

Измеритель

- **Содержит 4 измерительных канала сигналов частоты**
- **2048кГц при сопротивлении нагрузки 120 Ом**
- **обеспечивает измерения ошибки временного интервала ДВИ (TIE)**
- **2048 кГц относительно эталонного сигнала f_1 10 МГц**
- **обеспечивает в соответствии с рекомендацией G.810 вычисления**
 - **максимальной ошибки временного интервала МОВИ (MTIE)**
 - **девиации временного интервала ДВИ (DEV)**

- *относительной нестабильности частоты ($\frac{\Delta f}{f}$)*
- *Сравнение вычисленных характеристик МОВИ и ДВИ с масками Рекомендаций МСЭ-Т G.812, G.813, G.823, стандартов ETS 300 462 (3-6)*
- *Графическое отображение на экране монитора результатов текущих измерений ДВИ и численные значения $\frac{\Delta f}{f}$ в реальном масштабе времени, а также графическое отображение результатов вычислений МОВИ, ДВИ и $\frac{\Delta f}{f}$ с соответствующими масками*
- *по окончании измерений – вывод результатов измерений с дополнительными комментариями в файловой форме*
- *автоматический контроль наличия, тип и номинал входных сигналов, определение статуса синхросигнала (SSM биты), и аварийных ситуаций с отображением и документированием*
- *Время готовности к работе - через 10 секунд после включения электропитания*

Методика

Необходимая точность такова, что нельзя реализовать устройство наивно, то есть проводить измерения с частотой дискретизации, так как она равна

$$\nu = \frac{1}{T} \sim \frac{1}{0.3 \text{ ns}} \approx 3 \text{ GHz}$$

Но программно обрабатывать такой поток данных соответствующим образом почти невозможно и уж точно нецелесообразно для данной задачи.

Для решения этой проблемы используется схема на основе делителей частоты с динамически изменяющимися коэффициентами деления в соответствии с отрицательной обратной связью.

Таймеры со схемы в процессе работы переключаются между режимами работы, описываемыми несколькими наборами коэффициентов. Необходимо заранее заготовить все коэффициенты, поэтому одной из важных задач является нахождение оптимальных параметров схемы.

Это нетривиальная задача, поэтому для этого использовался Генетический Алгоритм – эвристический алгоритм оптимизации, отличающийся от многих других своей нацеленностью на поиск глобального оптимума функции, поступающей на вход, а не просто локального минимума и даже не просто «некоторого более или менее хорошего решения». Это достигается путём стимуляции разнообразия рассматриваемых решений. В соответствии с названием алгоритма, идея была взята из теории эволюции.

Генетический Алгоритм (далее: ГА) я реализовывал не классический (см. классический [1]), а с модификациями.

Постановка задачи такая, что нужно найти такие параметры функции, определённой на \mathbb{R}^n где n – количество параметров, для которых значение целевой функции минимально / максимально.

*Работа ГА действительно чем-то напоминает естественный отбор в природе. В процессе его исполнения происходит отбор различных наборов предполагаемых параметров, причём вероятность выжить и развиваться, «оставив своё наследство», у генома тем больше, чем больше его приспособленность, то есть *fitness*-функция в случае алгоритма.*

В ГА общепринято использовать ряд терминов, в том числе псевдобиологических:

«Особь» – Явная аналогия с живой природой, в которой особь также является участником отбора. Особь – набор параметров, представляющий один из допустимых аргументов целевой функции. Набор «живущих» особей изменяется («эволюционирует») в процессе работы алгоритма.

«Геном» – это, по сути, вектор, содержащий набор параметров, описывающих особь

«Ген» – неделимая («атомарная») составляющая часть генома

«Популяция, поколение» – набор генов, обрабатываемых алгоритмом на данной итерации.

«Мутация» – случайное (в соответствии с параметрами мутации) изменение генома

«Кроссинговер» – операция «скрещивания» геномов, то есть комбинации двух наборов параметров

Обычно ГА применяется к функциям с дискретной областью аргументов, а если она не является таковой, она искусственно

дискретизируется. Мной был использован альтернативный подход для нахождения более точного значения, не ограниченного дискретами.

В моей реализации геном представляется в памяти в качестве набора *floating-point* чисел, каждое представляет собой своё измерение.

Суть алгоритма заключается в том, что симулируется процесс естественного отбора, при котором вероятность генома, или плодов его мутации, или кроссинговера, то есть похожих на него геномов, попасть в следующее поколение тем больше, чем выше целевая функция у этого генома, то есть в среднем значение *fitness*-функции будет увеличиваться и стремиться к оптимуму.

Алгоритм выглядит примерно так:

- 1) Сгенерировать случайную популяцию
- 2) Пока не достигнуто необходимое значение целевой функции и не превышено максимальное допустимое количество итераций:
 - а. Провести операцию мутации над некоторыми геномами (количественные характеристики мутации случайны, их распределение зависит от процента выполнения алгоритма, для этого используется куча нормальных распределений)
 - б. Произвести подсчёт *fitness*-функции для каждой их особей популяции после мутации. В общем случае эта часть алгоритма имеет высокую вычислительную сложность и занимает большую часть работы алгоритма, поэтому я использовал *thread-pool* для ускорения вычислений (на моём компьютере использовалось 12 потоков)
 - с. Процесс генерации новой популяции: используется сложная система. Новая популяция имеет тот же размер, что и предыдущая, а состоит из следующих частей:

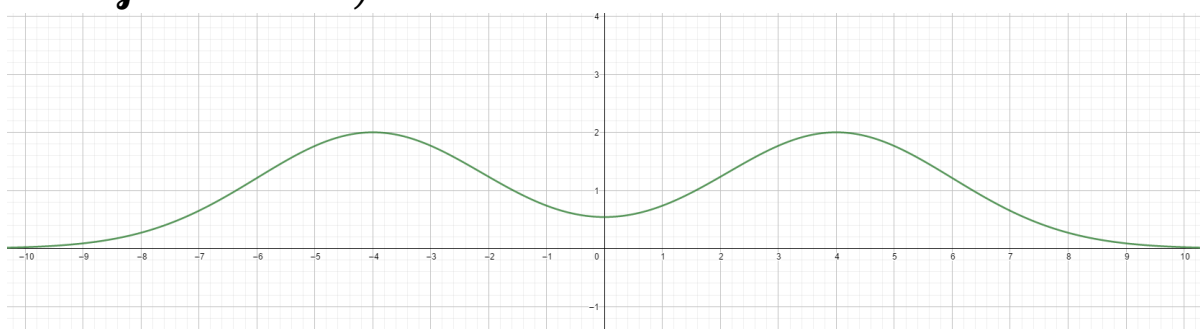
- i. Лучшая особь из предыдущей операции гарантированно попадает в новую популяцию, для остальных категорий происходит отбор
- ii. В моей реализации выделяется несколько стадий «элитарности» для наборов геномов. Для каждой из них выделено заранее известное количество мест в новой популяции. Отбор на эти места происходит случайный, причём вероятность пропорциональна некоторой возрастающей функции φ от значения целевой функции. В моём случае $\varphi(f_{val}) = (f_{val})^\alpha$ При увеличении индекса стадии «элитарности» возрастает и α , что естественно в соответствии с названием. Отобранные геномы отправляются на свои места без изменений.
- iii. Остальные места отведены для продуктов кроссинговера, то есть скрещивания особей. Отбор претендентов на места «родителей» происходит с α , существенно меньшим, чем для любой из элитарных категорий из очевидных соображений, что соответствует практике (то есть если поставить большее α , качество работы снизится).

3) Вернуть в качестве результата геном с лучшей *fitness*-функцией из достигнутых за время работы алгоритма.

Идея мутации состоит в том, чтобы генерировать некоторые решения, близкие к особям «новенькой» популяции вновь отобранных особей, то есть немного модифицировать лучшие из вновь полученных особей. Эта операция доказала свою эффективность как в живой природе, так и при работе алгоритма.

Идея кроссинговера состоит в том, что если взять несколько хороших геномов и скомбинировать, может получиться так, что будет

взято всё лучшее от обоих родителей. Будут происходить и обратные процессы, но тогда этот геном не пройдет отбор, не попадет в очередное поколение и будет «оставлён за бортом истории», уступив место более «удачливым»). В моей реализации по каждому параметру независимо происходит скрещивание: либо выбирается одно из 2-х исходных значений параметра у родителей, либо генерируется новое значение на основе старых с распределением, с такой плотностями вероятности (сумма нормальных с медианами в исходных точках):



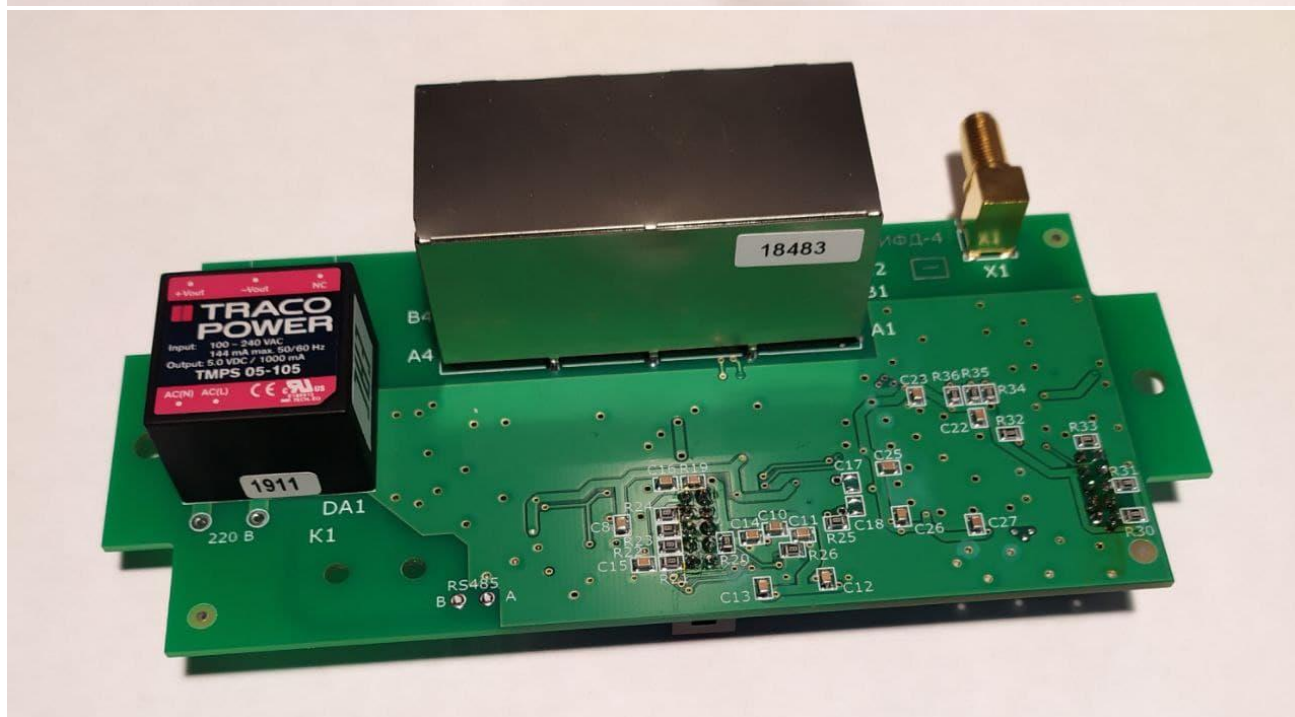
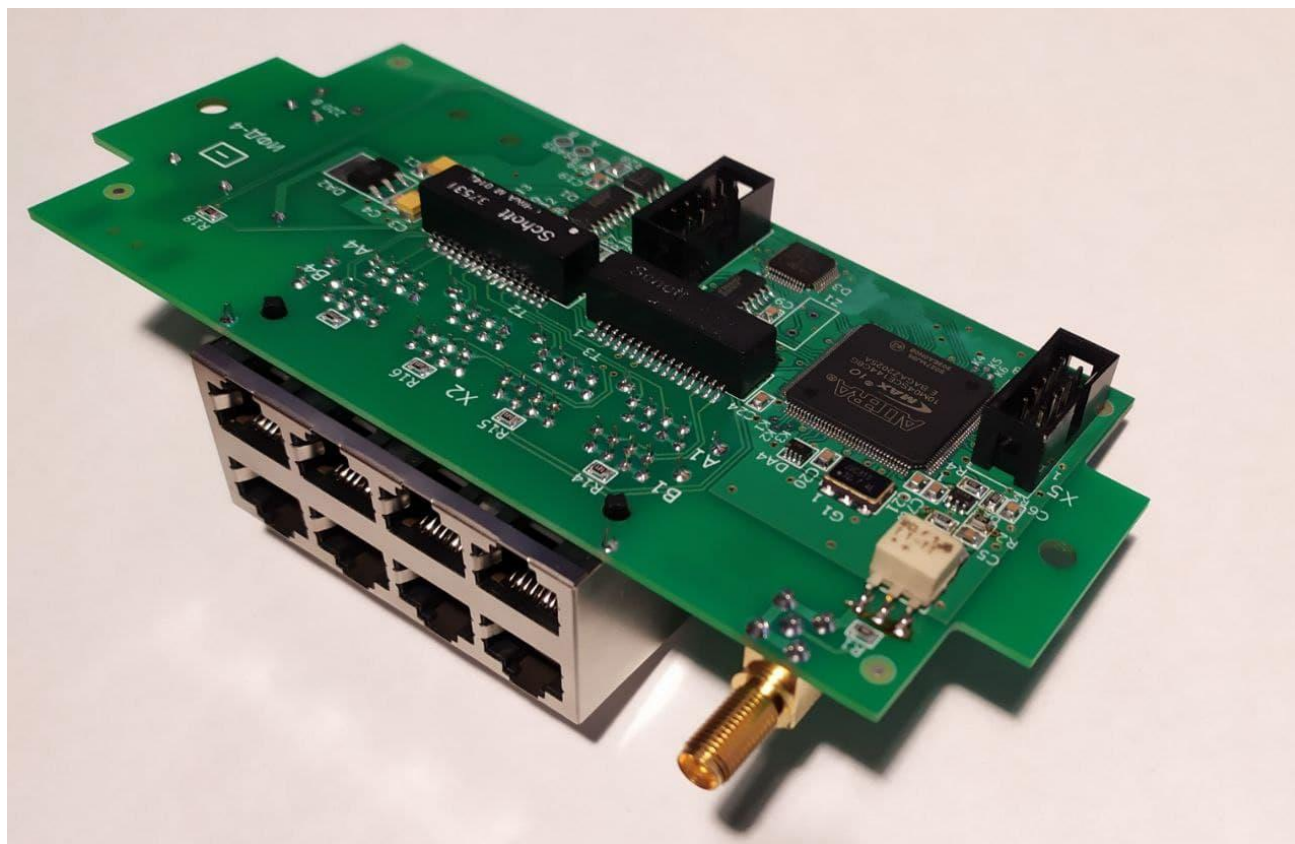
По ссылке [3] доступна моя реализация Генетического Алгоритма с вышеупомянутыми модификациями на языке C++, исходный код этой части проекта открыт.

После успешного подбора параметров я занялся проектированием принципиальной электрической схемы.

Важную роль в ней играют микроконтроллер (32-битный микроконтроллер STM32F103) и «ПЛИС» (Программируемая логическая интегральная схема). ПЛИС представляет собой схему с делителями частоты в случае его части для «измерителя» и адаптируемый генератор импульсов в соответствие с приходящими из компьютера значениями сгенерированного сдвига фазы.

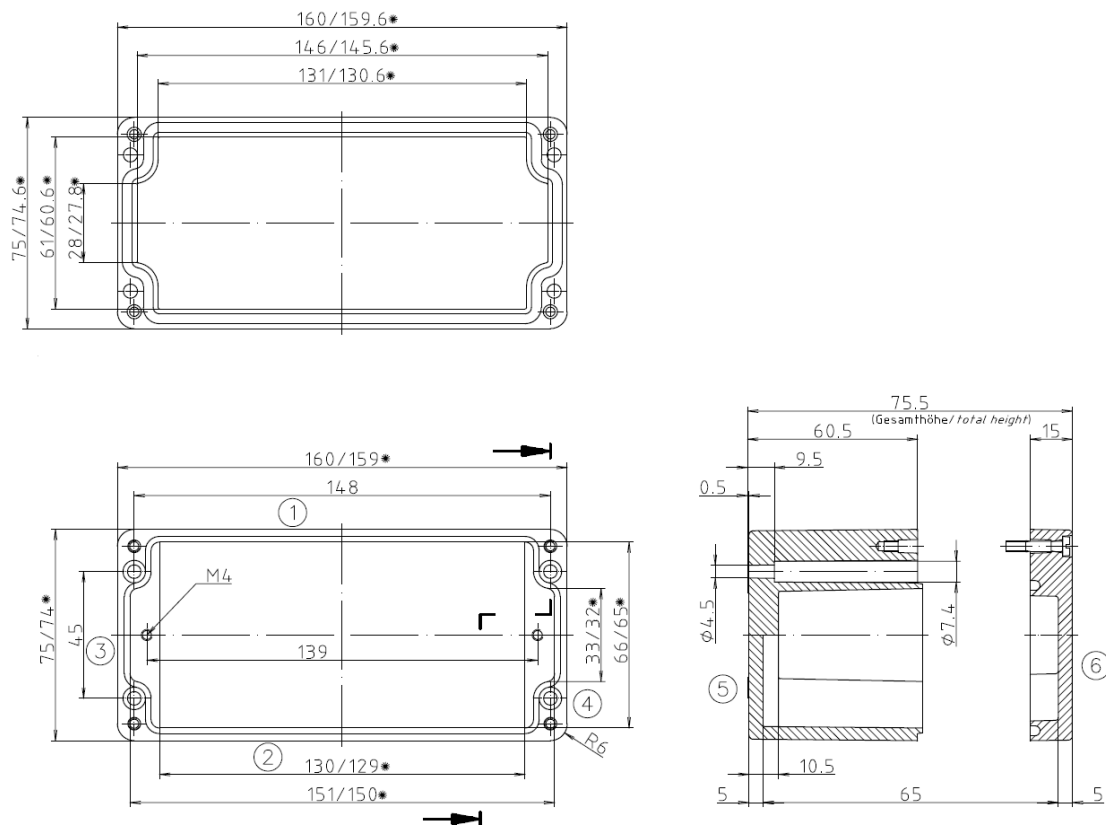
Используется модель ПЛИСа современной серии Intel Altera MAX10 («MAX10M04SCF E144»).

Эта схема была заказана к изготовлению в сторонней фирме, результат уже получен, так она выглядит в реальной жизни:

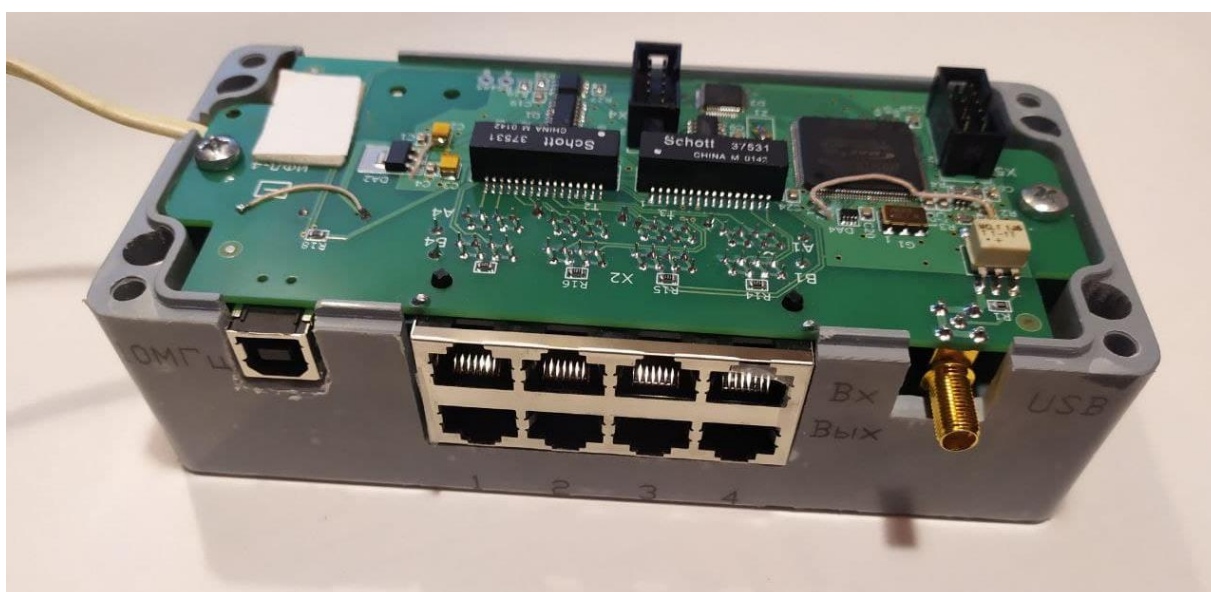


После этого устройство облачается в корпус.

Вот так выглядит чертёж «коробки»:



А это фото готового корпуса, собранного на стороннем предприятии:





Далее следует разработка программы для микроконтроллера, конечно же, это тоже именно моя задача.

А задача микроконтроллера при работе устройства сводится к обеспечению связи между компьютером и П/ИСо-м с некоторыми дополнениями. Он имеет определённый протокол общения с П/ИСо-м, при котором по очереди опрашивает П/ИС, запрашивая у него данные 6-и видов, запрос каждого из которых является подачей контроллером сигнала на некоторые из $\lceil \log_2 6 \rceil$ проводов. Число $\lceil \log_2 6 \rceil$ берётся очевидно откуда. А связь с компьютером происходит по протоколу USB Virtual Com Port.

Контроллер передаёт П/ИСу от компьютера, какой сигнал должен выдать имитатор, а в обратную сторону передаёт ошибку временного интервала, измеренную П/ИСо-м.

В список задач контроллера также входит подстройка управляемого генератора частоты, чтобы зависимость отклонения фазы от времени соответствовала данным, присылаемым компьютером. Для реализации подстройки частоты для контроля за управляемым

генератором используется цифро-аналоговая ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты (англ. PLL – Phase-locked loop) [2].

Ещё одной задачей контроллера является сглаживание поступающих измеренных данных с характерным «окном» размера порядка 10^0 «сэмплов» для убирания некоторого (действительно, присутствующего) шума.

Нельзя не отметить, что факт сглаживания не говорит о том, что следует увеличить дискрету и что настоящая оценка качества не соответствует, то есть сильно хуже выбранной дискреты.

Сглаживание лишь убирает локальный шум, но никак не изменяет динамику значений.

Изначально предполагалась к использованию сглаживание с помощью гауссовых ворот, то есть в соответствии с формулой:

$$smoothed_i = \frac{\sum_{j=0}^{j \leq n} signal_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=0}^{j \leq n} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}}$$

То есть значение сглаженного таким образом в точке с индексом i сигнала – это среднее взвешенное с коэффициентами, убывающими как $e^{-(\Delta i)^2}$ при удалении от рассматриваемой точки. Стоит упомянуть, что в общем случае здесь имеет смысл рассматривать не сами индексы, а моменты времени, в которые была получена очередная точка, но данном случае точки распределены равномерно по времени, то есть два подхода эквивалентны (с точностью до нормализации σ).

Как видно, просто подсчёт этой формулы для каждой точки даёт квадратичную асимптотику зависимости времени вычисления от количества измеренных точек.

Так как каждую секунду генерируется и регистрируется по 50 точек, а время проведения эксперимента до 10 суток должно поддерживаться. Таким образом, количество измеренных в процессе эксперимента точек может достигать

$$N_{max} = 50 \frac{\text{samples}}{\text{sec}} \cdot 60 \frac{\text{seconds}}{\text{minute}} \cdot 60 \frac{\text{minutes}}{\text{hour}} \cdot 24 \frac{\text{hours}}{\text{day}} \cdot 10 \text{ days} \\ \approx 43 \cdot 10^6 \text{ samples}$$

$$T \propto O(n^2) \approx 10^{15}$$

Что неприемлемо. Однако очевидно, что скорость уменьшения веса с отдалением от рассматриваемой точки будет настолько велика, что значения весов у отдалённых точек будет не больше погрешности измерений данных, а при некоторой разности индексов – даже меньше погрешности числового типа. Таким образом имеет смысл ввести некоторую числовую характеристику, при достижении которой произведением значения в очередной точке и веса в ней при движении по индексу массива от индекса, рассматриваемого в данный момент, следует остановить добавление дальнейших точек к среднему взвешенному. Этот процесс, очевидно, следует проводить в обе стороны от рассматриваемой точки.

Таким образом, алгоритм с доработками описывается такой формулой:

$$\text{smoothed}_i = \frac{\sum_{j=i}^{i+=1; \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}} < \varepsilon} \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=i}^{i+=1; \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}} < \varepsilon} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}} + \frac{\sum_{j=i}^{i-=1; \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}} < \varepsilon} \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=i}^{i-=1; \text{signal}_j \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}} < \varepsilon} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-j)^2}{2\sigma^2}}}$$

Теперь с пренебрежимо малыми потерями точности можно произвести сглаживание за $\approx O(|\text{samples}|)$, единственное, что на практике для робастности алгоритма использовалась остановка добавления не просто при достижении данного условия, а при достижении его несколькими точками подряд (чтобы случайные нули или близкие к ним числа не портили ситуацию).

Мои эксперименты показали, что этот способ сглаживания лучше себя проявляет в сложных случаях, однако на практике оказалось достаточно обычного среднего арифметического в скользящих воротах, так как данные и без того приходили довольно «гладкие»:

$$smoothed_i = \frac{\sum_{j = \max(0, i - \frac{WindowSize}{2})}^{j < \min(n, i + \frac{WindowSize}{2})} signal_i}{\left| \min\left(n, i + \frac{WindowSize}{2}\right) - \max\left(0, i - \frac{WindowSize}{2}\right) \right| + 1}$$

Больше про фильтрацию см. [4]

Остальная часть задачи остаётся за приложением для компьютера. В его обязанности входит:

- *Гибкая настройка динамики фазового сдвига относительно эталонного сигнала имитатором во времени, то есть возможность выбрать вид закона (линейный, синусоидальный), а также его параметры.*
- *Соединение с устройством, через одну из его частей: микроконтроллер (возможность выбора устройства из подключённых).*
- *Показывать графики сдвигов по фазе имитаторе и измерителе во время замера, расширяя поле зрения необходимым образом в реальном времени, количество точек может достигать 1×10^8 (так как эксперимент может проводиться до 10 суток).*
- *Возможность проанализировать полученные при измерениях данные, в том числе – приближать необходимым образом.*
- *Подсчёт нижеупомянутых численных характеристик сигналов, а также отображение их графиков на подотрезках.*
- *Возможность их сравнения с эталонными значениями («масками»), хранящихся в файлах*

Согласно стандартам ([5], [6]), прибор должен уметь считать численные характеристики (т.н. «метрики») качества сглаживания фазовых блужданий. Они имеют названия «МОВИ» и «ДВИ».

«МОВИ» – Максимальная ошибка временного интервала (в английской литературе: *Maximum time interval error* (MTIE))

«ДВИ» – Девиация временного интервала (в английской литературе: *Time Interval Deviation* (TID))

Сама ошибка временного интервала, то есть то, что показано на исходном графике, так и называется: «ОВИ».

Они считаются по следующим формулам:

$$MTIE = \max_{i=0}^{i < n} (TIE_i)$$
$$TID = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{i < n} \left(TIE_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{i < n} TIE_i \right)^2}$$

, где «TIE» – это зависимость того самого сдвига по фазе в измеряемом, упомянутого выше, от времени. Это то, что приходит в компьютер из контроллера (с поправкой на целочисленное переполнение).

От устройства требуется строить график зависимости МОВИ и ДВИ от данных в диапазоне $[0, t]$ от t . После чего для оценки качества работы измеряемого устройством внешнего прибора согласно ГОСТам и международным стандартам, программа предоставляет интерфейс для сравнения динамики значений ОВИ и ДВИ во времени с эталонными, то есть заданными ГОСТами. Эти эталонные функции называются масками и хранятся в файлах. Маски существуют как на характеристику «МОВИ», так и на «ДВИ». Они описывают максимально допустимую зависимость величины (той величины,

для которой это маска) в данный момент времени, от этого момента времени. То есть

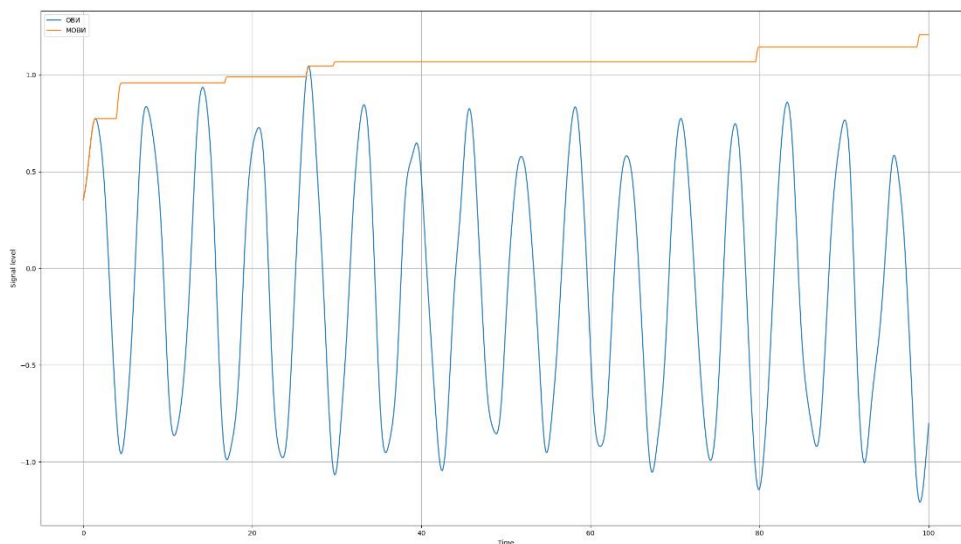
$$mask_i : \forall j \leq i : magnitude_j \text{ should be } \leq mask_i$$

Стоит отметить, что эти маски хранятся в логарифмической шкале (по обеим осям), в ней же их следует и применять. Применять в данном случае – это показывать график и маску оператору в одних осях. Даже без маски значения МОВИ и ДВИ показываются в логарифмических шкалах по обеим осям, так как это более информативно, особенно – в случае длительного измерения.

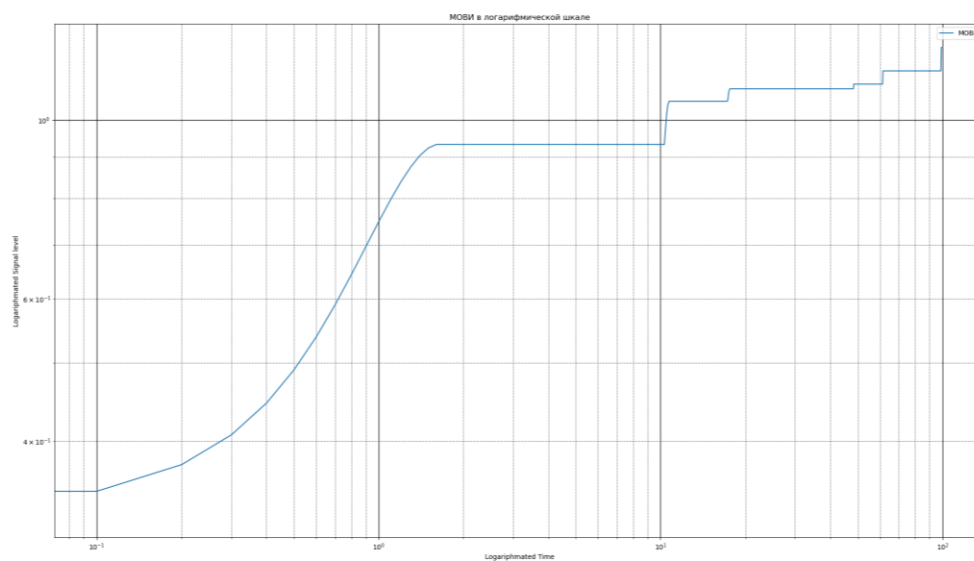
Несложно сделать автоматическую проверку того, подходит ли график под маску, но в данном случае она довольно бесполезна, так как это и так видно по графикам, а мнение «оператора» важнее.

Так выглядят эти характеристики на графиках:

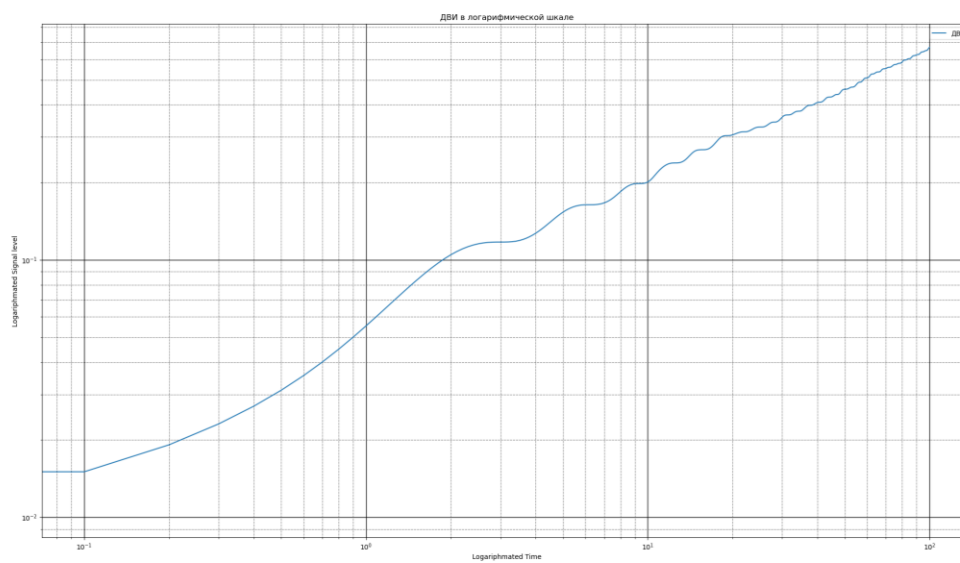
1. ДВИ и его МОВИ с течением времени:



2. МОВИ в логарифмических координатах:

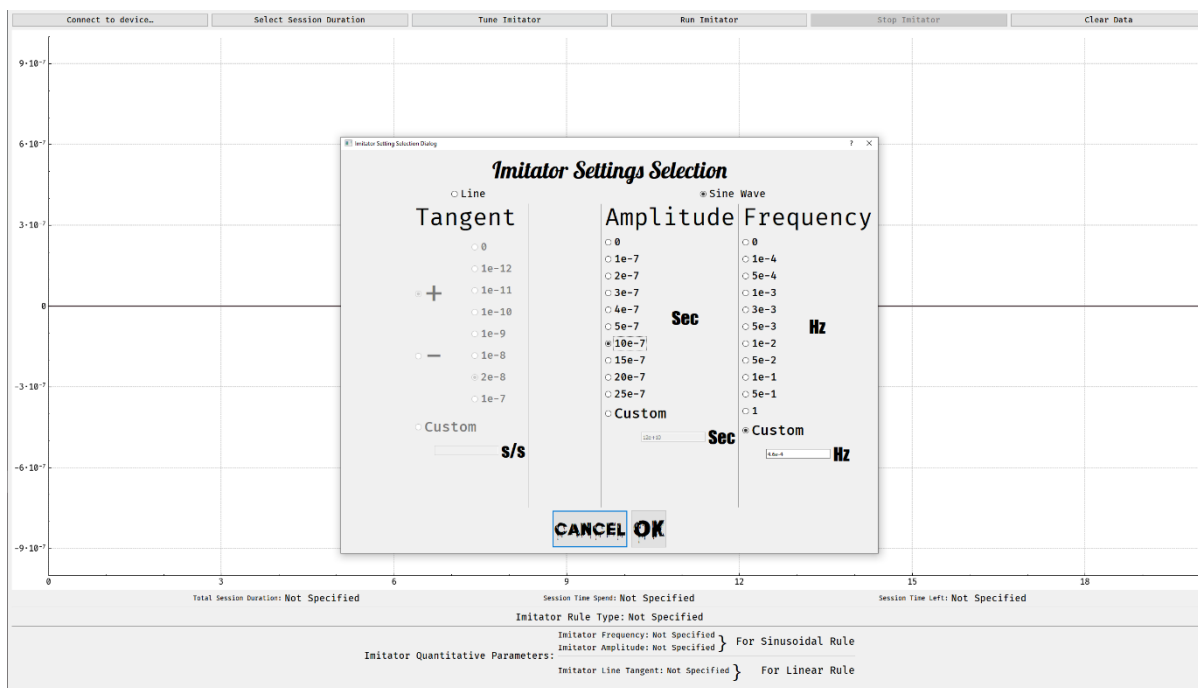


3. ДВИ в логарифмических координатах:

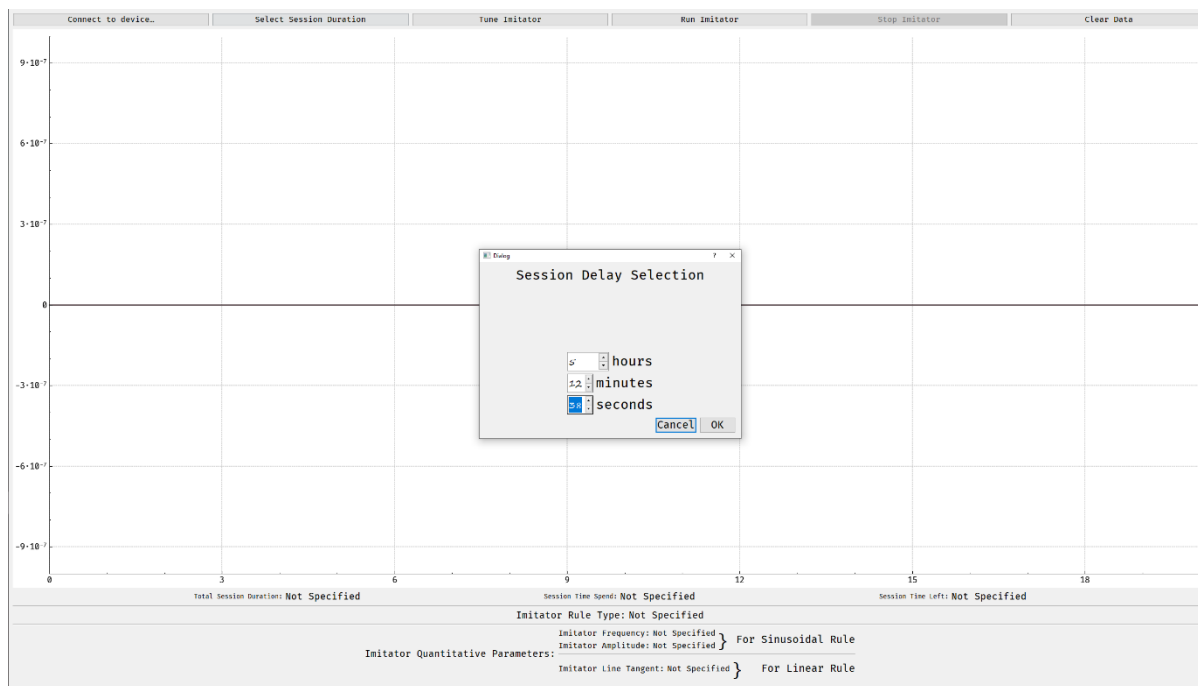


Далее приведены дополнительные *screenshot*'ы из моей программы с демонстрацией её работы.

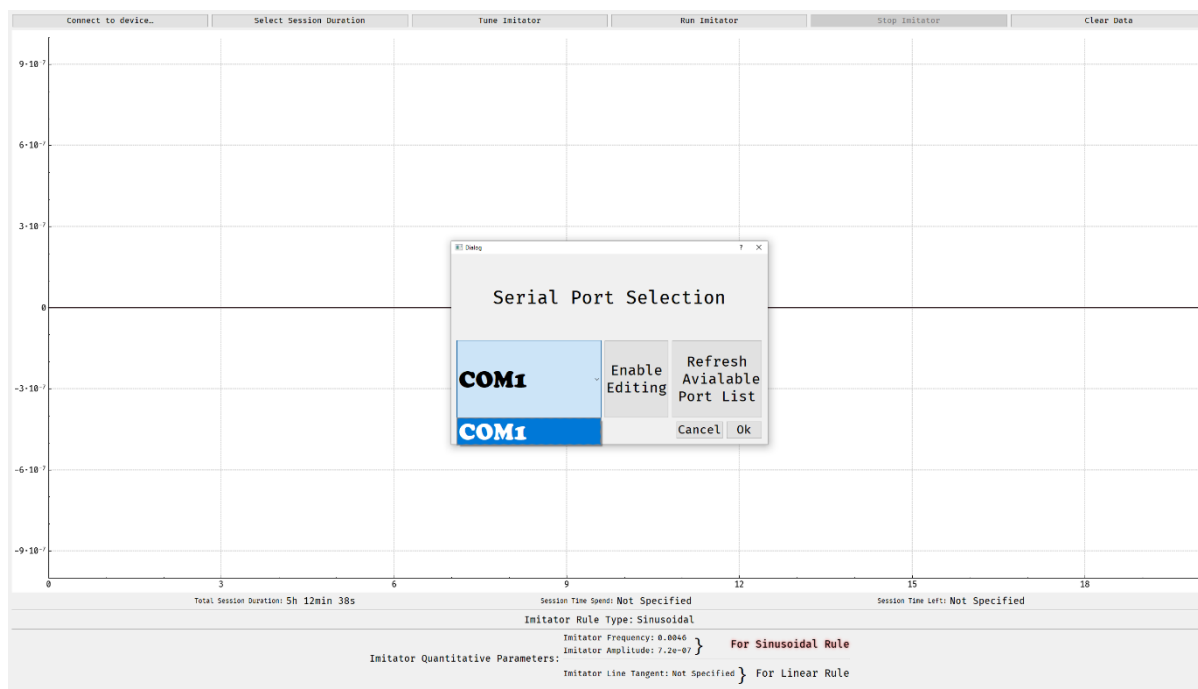
1) Диалог для выбора режима работы имитатора:



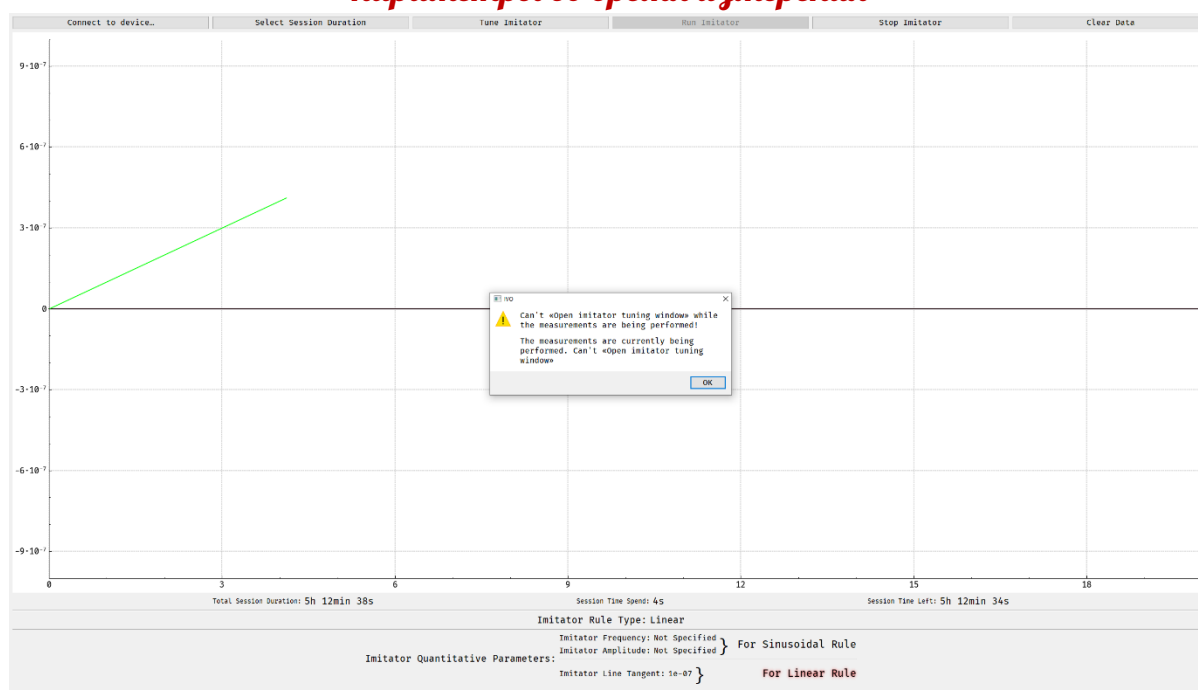
2) Диалог для выбора длительности сессии эксперимента, после которой он автоматически заканчивается (предлагается выбрать, сколько часов, минут и секунд будет длиться замер):



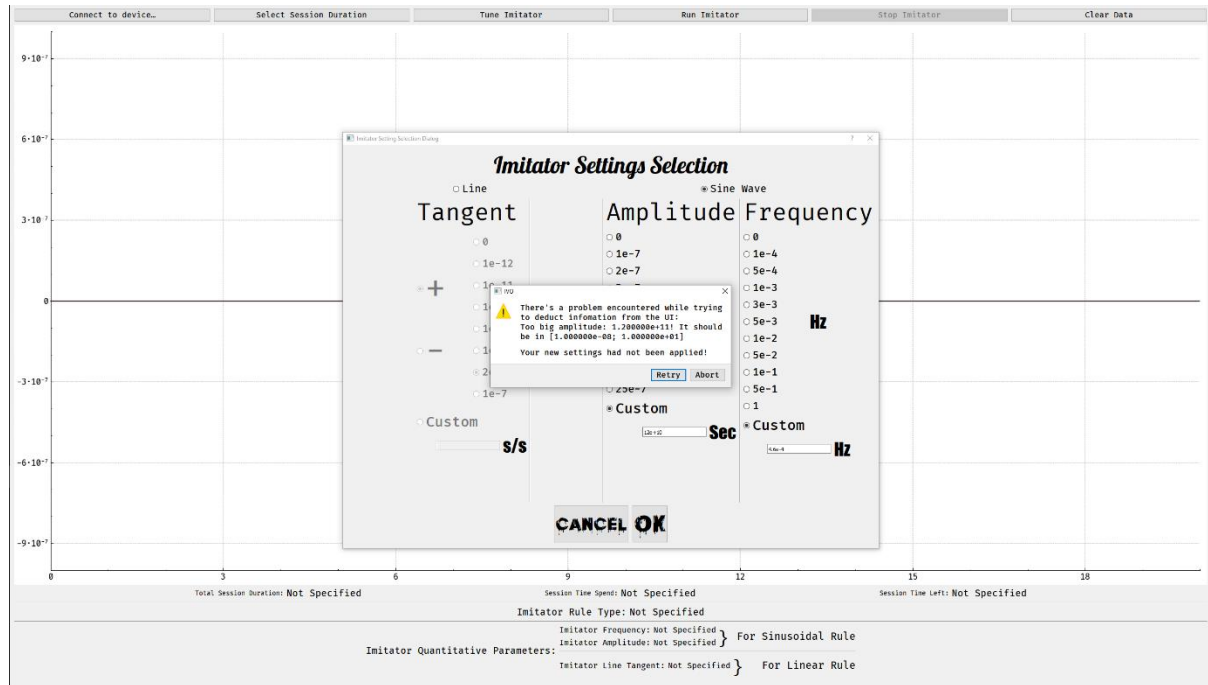
3) Диалог для выбора порта, по которому произойдёт подключение к устройству из списка доступных в операционной системе (есть поддержка обновления этого списка и разрешения ручного редактирования названия/номера порта).



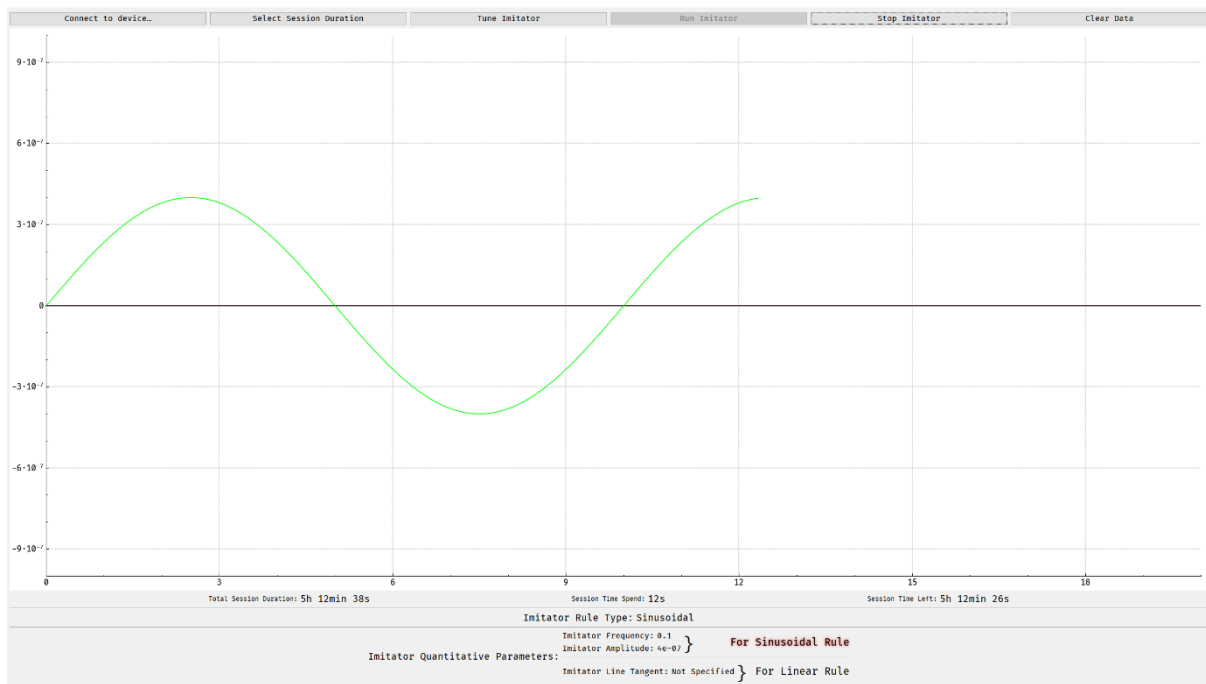
4) Пример обработки ошибок при попытке пользователем изменить параметры во время измерения



5) Пример обработки ошибок при неверном указании параметра, то есть если его значение выходит за диапазон допустимых:



6) Пример работы программы во время измерений (красным подсвечивается режим работы (по синусоидальному или по линейному закону), производится подсчёт прошедшего времени, отображается также и оставшееся время сессии):



Полученные результаты и выводы

Несмотря на то, что большая часть работы выполнена, вследствие большого объёма работы и карантинных мер, есть ещё «поле» для развития.

Разработана и отправлена на сборку электрическая схема, разведена печатная плата, написана программа для ПЛИС, намечен алгоритм работы контроллера (32-разрядный микроконтроллер STM32F103RB) и реализована передача данных между компьютером и контроллером по USB Virtual Com Port, написано примерно 66.6% программы для компьютера (осталось добавить поддержку используемых в отрасли форматов представления данных, в том числе – поддержку открытия файлов со стандартизированными масками и их просмотра).

Остаётся завершить программы для микроконтроллера и для компьютера, отладить совместную работу всех компонентов вместе и провести выпускные испытания.

В перспективе планируется добавить дополнительные режимы работы, расширив функционал устройства.

Список используемых источников

Ссылки (References)

[1] Lance D. Chambers. *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*. 2001

[2] Henri de Bellescize, "La réception synchrone," *L'Onde Électrique* (later: *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*), vol. 11, pages 230-240 (June 1932).

Открытая часть исходного кода программы:

[3] Генетический алгоритм:

<https://github.com/donHumata03/PowerfulGA>

[4] *Filtering Techniques for Chaotic Signal Processing*: Denis Butusov, Timur Karimov, Alexander Voznesenskiy

Рекомендации и стандарты:

[5] G812: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.812-200406-1!!PDF-{{type=items}}

[6] G811: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.811-199709-1!!PDF-{{type=items}}

[7] Отечественный конкурент: <https://alto-spb.ru/2019/12/27/%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C-%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85-%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%B8%D0%B2%D0%BE-2/>

[8] Иностранный (Швейцарский) конкурент:

https://telecom.vilcom.ru/products/analizatory_kachestva_sinhronizacii/877

Благодарности

Следует выразить благодарность научным руководителям к.т.н., генеральному директору ОАО «НПП «КОМЭТЕХ» Сторожуку Николаю Леонидовичу и к.т.н., с.н.с., начальнику отдела Воробьеву Александру Сергеевичу за руководство, консультации и предоставленную площадку для проведения практической работы.