

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

Институт Радиоэлектроники  
Кафедра Радиотехнических систем

**ВЫПУСКНАЯ РАБОТА**

бакалавра техники и технологии  
*(квалификация, присваиваемая по завершении образования)*

по направлению 210400 Радиотехника

---

Тема: Экспериментальное исследование кратковременной нестабильности частоты опорных генераторов для применения в радионавигационных приёмниках.

Студент	ЭР-15-10		Сергеев Никита Игоревич
	группа	подпись	фамилия, и., о.,
Научный руководитель	ассистент		Шатилов А.Ю.
	должность	звание	подпись
Консультант инженер			Нагин И.А.
	должность	звание	подпись
Консультант ассистент			Корогодин И.В.
	должность	звание	подпись

«Работа допущена к защите»

Зав. кафедрой профессор		Перов А.И.
	звание	подпись

Дата \_\_\_\_\_

Москва

20 \_\_\_\_ г.

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1.Характеристики неустойчивости частоты ОГ .....</b>	<b>5</b>
<b>2.Обзор экспериментальной методики исследований неустойчивости ОГ. 8</b>	
<b>3.Пошаговая методика получения выборки дрейфа фазы.....</b>	<b>11</b>
<b>4.Описание разработанного ПО по обработке выборок дрейфа фазы .....</b>	<b>17</b>
<b>5.Результаты исследований динамической ошибки в системах ФАП при различных ОГ .....</b>	<b>22</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>31</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>32</b>
<b>Приложение. Протокол обработки выборок дрейфа фазы ОГ .....</b>	<b>33</b>

## Введение

В настоящее время при разработке радионавигационной аппаратуры уделяется большое внимание вопросу о нестабильности фазы и частоты в источниках сигналов, таких как опорный генератор (ОГ), синтезатор частот.

В ряде приложений навигационной аппаратуры на неподвижных объектах и при комплексировании с высокоточными инерциальными навигационными системами (ИНС) нестабильность ОГ вносит основной вклад в динамическую ошибку слежения за сигналами спутниковой радионавигационной системы (СРНС), что ограничивает её точность и помехоустойчивость. В системе фазовой автоподстройки (ФАП) нестабильность ОГ приводит к высоким динамическим ошибкам слежения за фазой, что не позволяет сузить полосу, а следовательно и уменьшить флуктуационную ошибку, повысить помехоустойчивость.

Указанные эффекты вызваны, прежде всего кратковременной нестабильностью частоты. Известна численная характеристика кратковременной нестабильности частоты ОГ - девиация Аллана - мера нестабильности частоты генераторов. Девиация Аллана предназначена для оценки стабильности частоты за счёт шумовых процессов без учёта систематических ошибок и отрицательных воздействий, таких как смещение номинала частоты или температурное воздействие. Область применения источников сигналов времени и частоты, где требуется высокая стабильность, весьма обширна и включает:

1) Ракеты и космические летательные аппараты, где генераторы используются в комплексированных СРНС/ИНС системах и вносят подчас большее динамическое возмущение в следящие системы, чем ошибки ИНС.

2) Беззапросных измерительные системы СРНС, в которых при измерении дальности методом сравнения фазы дальномерных сигналов с фазой опорного сигнала нестабильность любого из работающих в системе генераторов приводит к погрешности в определении дальности.

3) Космические связные системы, где повышение стабильности несущих частот приводит к снижению уровня динамических ошибок и повышению качества работы, включая системы синхронизации.

4) Геодезическая аппаратура, где важна точность определения координат точек земной поверхности в режимах реального времени и постобработки в условиях многолучёвости.

5) Контрольно-корректирующие станции (ККС), где повышение стабильности ОГ позволяет более точно определять корректирующие поправки к псевдодальностям.

Во всех перечисленных применениях нестабильность частоты ОГ критична для получения требуемых характеристик точности и помехоустойчивости. Попытка анализа влияния нестабильности ОГ на эти характеристики позволило выявить ряд нерешенных на сегодняшний день вопросов, а именно:

- 1) Зависимость предельной минимальной полосы ФАП, при которой сохраняется слежение за системой СРНС от девиации Аллана ОГ.
- 2) Зависимость динамической ошибки в системе ФАП приёмника спутниковой навигации от девиации Аллана.
- 3) Величина дополнительной нестабильности частоты и фазы вносимой синтезаторами частот на передатчике спутника и в гетеродине приемника.

Проведённый анализ научно-технической литературы показал, что методические проработки исследования указанных вопросов, доведённые до инженерной практики, отсутствуют. Поэтому в работе предпринята попытка экспериментального нахождения зависимости динамической ошибки в системе ФАП от девиации Аллана различных ОГ, применяемых в СРНС.

Объектом исследований является система фазовой автоподстройки (ФАП) в приемнике систем спутниковой навигации.

Цель работы – нахождение экспериментальной зависимости динамической ошибки в системах автоподстройки (ФАП) от девиации Аллана различных ОГ, применяемых в НАП СРНС.

Для достижения данной цели решались следующие частные задачи.

- 1) Изучение и анализ методов описания нестабильности опорного генератора.
- 2) Изучение экспериментальной методики исследований нестабильности частоты и фазы ОГ.
- 3) Освоение инструментария исследования, в том числе:
  - измерительных приборов(оснастки);
  - математического пакета Matlab.
- 4) Получение выборок фазы реальных ОГ, используя методику измерений.
- 5) Разработка программ обработки измерений в среде Matlab по теме исследования.
- 6) Обработка полученных результатов измерений в среде Matlab.
- 7) Нахождение зависимостей динамической ошибки в системах ФАП 2-го и 3-го порядка от девиации Аллана при разных временах осреднения  $\tau$  и при разных полосах ФАП.

## 1. Характеристики нестабильности частоты ОГ

Нестабильность частоты генераторов - характеристика, определяемая допустимым отклонением частоты генератора от заданного номинального значения при работе в заданных условиях.

На нестабильность частоты ОГ влияют внешние воздействующие факторы - температура и вибрация, старение и фазовые шумы.

Любой генератор в определенной степени подвержен влиянию окружающей среды. Она несомненно может играть решающую роль (например, в случае самолётной аппаратуры). Не следует рассчитывать на хорошую стабильность частоты при работе в условиях окружающей среды, отличных от условий измерения.

**Температурная нестабильность** - отклонение частоты при заданной опорной температуре в следствие работы в заданном (внешнем) интервале температур. В результате **старения** характеристики случайных флюктуаций частоты могут изменяться; например, флюктуации частоты цезиевых часов могут возрасти после нескольких лет непрерывной работы. Таким образом, результаты «кратковременных» измерений справедливы лишь в течение ограниченного промежутка времени.

**Долговременная нестабильность** - отклонение частоты на длительных интервалах времени. При рассмотрении нестабильности на более длительном промежутке времени частота отклоняется сильнее. Долговременная нестабильность ассоциируется с интервалом времени от 1 мин до 1 года. Суточная нестабильность ассоциируется с интервалом времени 24 часа (сутки). Годовая нестабильность ассоциируется с интервалом времени 1 год.

**Фазовые шумы** – характеристика для описания кратковременной нестабильности ОГ в спектральной области сигнала. Фазовые шумы возникают вследствие нестабильности задающего генератора, шумящими электронными узлами, например выходными усилителями или умножителями частоты. Данная мера кратковременной нестабильности частоты генератора в частотной области обычно выражаемая как спектральная плотность мощности случайных отклонений фазы.

Важнейшими характеристиками для описания нестабильности ОГ являются **девиация Аллана** (дисперсия Аллана или парная дисперсия) и **девиация Адамара**. Девиация Аллана предназначена для оценки стабильности частоты за счёт шумовых процессов без учёта систематических смещений частоты.

**Девияция Аллана** выражается следующей формулой [3]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left( \overline{y_{n+1}} - \overline{y_n} \right)^2 \right\rangle, \quad (1)$$

где под  $\langle \dots \rangle$  понимается операция взятия математического ожидания,  $\overline{y_n}$  — n-ное измерение, полученное усреднением выборки длительностью  $\tau$ .

### **Дисперсия Адамара.**

Дисперсия Адамара рассматривается применительно к спектральному анализу величины  $y(t)$  по данным измерений  $Y_k$ , т.е для оценки параметра в частотной области  $S_y(f)$  по данным во временной области, получаемых при помощи цифровых счётчиков [1].

Применение  $\sigma_y^2(\tau)$  в спектральном анализе ограничено. Формула

$$\sigma_y^2(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_y(f) \frac{2 \sin^4 \pi \tau f}{(n \tau f)^2} df$$

показывает, что  $\sigma_y^2(\tau)$  не очень подходит для

спектрального анализа  $y(t)$  с высоким разрешением, так как слишком широк главный лепесток передаточной функции. Поэтому при заданном значении времени усреднения  $\tau_c$  получаемая в результате измеряемая оценка  $\hat{\sigma}_y^2(\tau_c)$  не позволит найти точную оценку  $S_y(f_c)$ , где  $f_c \approx 0.37 \tau^{-1} c$  представляет собой центральную частоту главного лепестка, соответствующую  $\tau = \tau_c$ .

Следствием этой недостаточности селективности служит тот факт, что в случае степенных спектральных плотностей как белому фазовому шуму, так и фазовому фликкер-шуму соответствует примерно один и тот же наклон, т.е  $\sigma_y(\tau) \sim (\tau^{-1})$ .

С учётом связи между последовательностями измерений и передаточными функциями дисперсия Адамара определяется как такая последовательность измерений, которой соответствует передаточная функция с узким лепестком.

Дисперсия Адамара выражается следующей формулой [1]:

$$\langle \sigma_H^2(N, T, \tau) \rangle = \langle (\overline{y_1} - \overline{y_2} + \overline{y_3} - \dots - \overline{y_N})^2 \rangle$$

В данной работе исследуются динамические ошибки систем ФАП от девиации Аллана. Дисперсия Адамара не используется, поскольку ошибка нестабильности ОГ в частотной области не требуется.

В работе рассматривались следующие типы ОГ: термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТСХО), термостатированные кварцевые генераторы (ОСХО), ОГ основанные на технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), атомный стандарт частоты.

Термокомпенсированный кварцевый генератор (ТСХО) – генератор, стабилизированный кварцем, отклонение частоты которого в зависимости от температуры уменьшено при помощи вмонтированной в него системы авторегулирования.

Термостатированный кварцевый генератор (ОСХО) – это генератор, стабилизированный кварцем, в котором термостатирован, по крайней мере, кварцевый резонатор таким образом, что температура кварцевого резонатора поддерживается постоянной. Это обеспечивает постоянство частоты генератора в интервале рабочих температур ОСХО независимо от температурно-частотной характеристики кварцевого резонатора.

Современные ТСХО и ОСХО обеспечивают надёжность и стабильность частоты в неблагоприятных условиях.

#### Генераторы на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Основным элементом таких генераторов является МЭМС–резонатор. Программируемый генератор представляет собой стабилизированный синтезатор частоты. В состав микросхемы входит МЭМС резонатор, генератор опорной частоты, цепь фазовой автоподстройки частоты с программируемыми коэффициентами делителей, блок температурной компенсации частоты и блок программируемого источника питания.

Интеграция МЭМС - резонаторов в структуру интегральной микросхемы требует специальной технологии обработки пластины, что усложняет процесс производства и соответственно увеличивает стоимость конечного изделия.

Преимуществами устройств на базе МЭМС являются компактные размеры, а также устойчивость к ударам и вибрациям, сверхнизкий джиттер. Из недостатков можно отметить относительно узкий диапазон частот, обеспечиваемый такой технологией.

Атомные часы - прибор для измерения времени, в котором в качестве периодического процесса используются собственные колебания, связанные с процессами, происходящими на уровне атомов или молекул.

Атомные часы являются основным компонентом навигационного космического аппарата (НКА) и наземного комплекса управления (НКУ) спутниковых радионавигационных систем и обеспечивают точность радионавигационных определений. Атомные часы используются также в системах спутниковой и наземной телекоммуникации, в том числе в базовых станциях мобильной связи, международными и национальными бюро стандартов и службами точного времени, с которыми осуществляется синхронизация СРНС.

Атомные часы состоят из нескольких частей:

1. Квантовый дискриминатор
2. Кварцевый генератор

### 3. Комплекс электроники

Кварцевый генератор представляет собой автогенератор, в качестве резонансного элемента которого используются пьезоэлектрические моды кварцевого кристалла. Генерируемые им электромагнитные колебания имеют фиксированную частоту, равную, как правило, 10 МГц, 5 МГц или 2,5 МГц, с возможностью перестройки в небольших пределах ( $\pm 10^{-6}$ , например, изменением температуры кристалла). Обычно долговременная стабильность кварцевого резонатора мала и составляет около  $\Delta\nu/\nu = 10^{-7}$ . С целью повышения его стабильности используют колебания атомов или молекул, для чего колебания кварцевого генератора с частотой  $\nu_0$  постоянно сравниваются с помощью частотно-фазового компаратора с частотой атомной линии  $\nu_a$ , регистрируемой в квантовом дискриминаторе. При появлении разницы в фазе и частоте колебаний, схема обратной связи подстраивает частоту кварцевого генератора до требуемого значения, повышая тем самым стабильность и точность часов до уровня  $\Delta\nu/\nu = 10^{-15\dots 13}$ .

## 2. Обзор экспериментальной методики исследований нестабильности ОГ

Экспериментальная методика изложена в [2] и основана на взаимном гетеродинировании сигналов от двух ОГ одной серии номиналом 10 МГц, как показано на рис. 2.1.

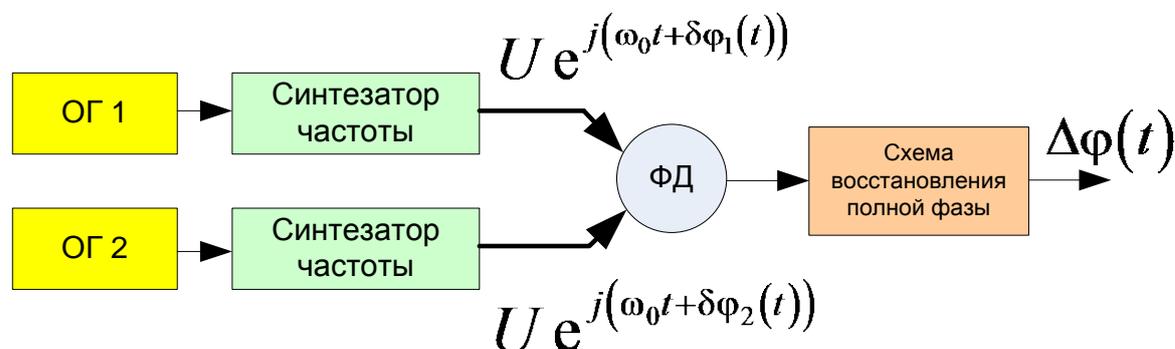


Рисунок 2.1 – Принцип получения процесса дрейфа фазы ОГ

Сигнал одного из ОГ переносится на несущую частоту ГЛОНАСС L1 1602 МГц, другого – на 1698 МГц. Результирующие сигналы подаются на входы аналогового смесителя, на выходе которого формируется разностное колебание на промежуточной частоте 96 МГц. Это колебание оцифровывается и переносится на нулевую частоту с помощью цифрового квадратурного гетеродина. Вся цифровая часть и АЦП тактируется от второго исследуемого ОГ. Цифровые квадратуры результирующего сигнала записываются в память и далее обрабатываются на

компьютере специальным программным обеспечением. Структурная схема установки, реализующей данную методику, представлена на рис. 2.2.

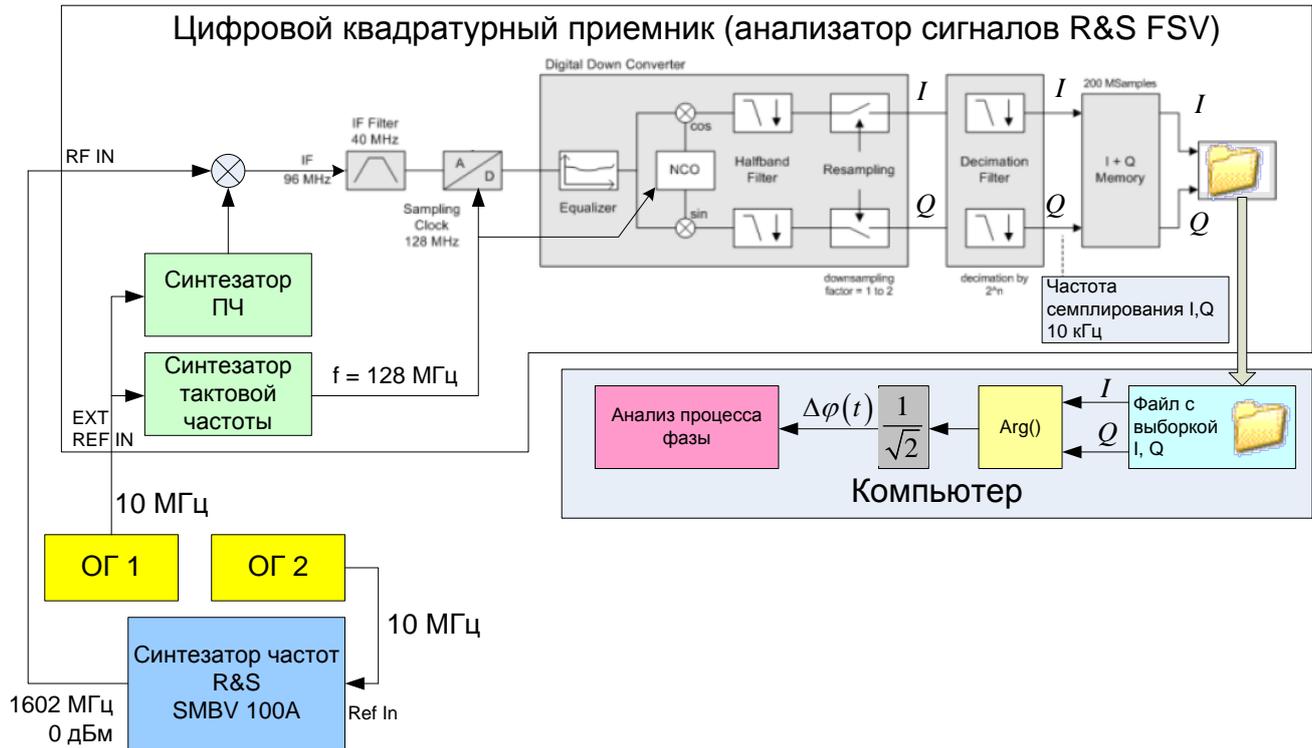


Рисунок 2.2 – Структурная схема экспериментальной установки для записи и анализа процессов нестабильности фазы ОГ

Записанные цифровые квадратуры являются комплексным процессом вида

$$\dot{x}(t_k) = U \exp \left\{ j \left( \delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k) \right) \right\}, \quad (2)$$

где  $\delta\varphi_1(t_k), \delta\varphi_2(t_k)$  - соответствующие отклонения фазы 1-го и 2-го ОГ относительно номинального линейного роста фазы на несущей частоте 1602 МГц. Из  $\dot{x}(t_k)$  легко выделить процесс

$$\delta\varphi(t_k) = \frac{\delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k)}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

который приближенно будем считать процессом кратковременной нестабильности фазы для ОГ данной серии с учетом переноса колебания ОГ на несущую 1602 МГц.

Характеристики разработанной установки:

- инструментальная среднеквадратическая погрешность измерения процесса разности фаз  $\delta\varphi(t_k)$ :  $0,06^\circ$  (погрешность носит шумовой характер);

- частота дискретизации процесса  $\delta\varphi(t_k)$ : 10 кГц;

- максимальная длительность выборки: 20000 с (200 Msamples).

Разработанное в [2] программное обеспечение позволяет:

- находить девиацию Аллана для исследуемого ОГ;

- находить время накопления  $T_{acc}$ , соответствующее максимуму отношения с/ш, для разных участков выборки (см рис. 1, точки T1, T2, T3);
- находить динамическую ошибку слежения за фазой ОГ в ФАП 2-го или 3-го порядка с заданной полосой;
- находить минимальную полосу ФАП 2-го или 3-го порядка, при которой сохраняется слежение за фазой ОГ (шумы наблюдений отсутствуют).

В рамках бакалаврской работы требуется расширить возможность ПО для нахождения зависимости динамической ошибки от девиации Аллана.

Динамическая ошибка на выходе системы ФАП рассчитывается методом имитационного моделирования. Для этого на вход системы ФАП подается экспериментально полученный процесс  $\delta\varphi(t_k)$ , а на выходе фиксируется реализация динамической ошибки слежения за этим процессом. Среднеквадратическое значение динамической ошибки рассчитывается как корень из выборочной дисперсии для данной реализации. Затем с помощью методики [2] определяется девиация Аллана для этого процесса и, сопоставляя полученные данные для разных ОГ с соответствующими динамическими ошибками, строится график зависимости динамической ошибки от девиации Аллана.

### 3. Пошаговая методика получения выборки дрейфа фазы

- 1) Собрать установку в соответствии с рис. 2.2. Внешний вид собранной установки приведён на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Внешний вид экспериментальной установки

- 2) Включить блок питания. Выставить напряжение питания на блоке питания → 5 В, ток ограничения → 1 А.

Внешний вид плат оснастки опорных генераторов подключённых к приборам приведён на рисунке 3.2.

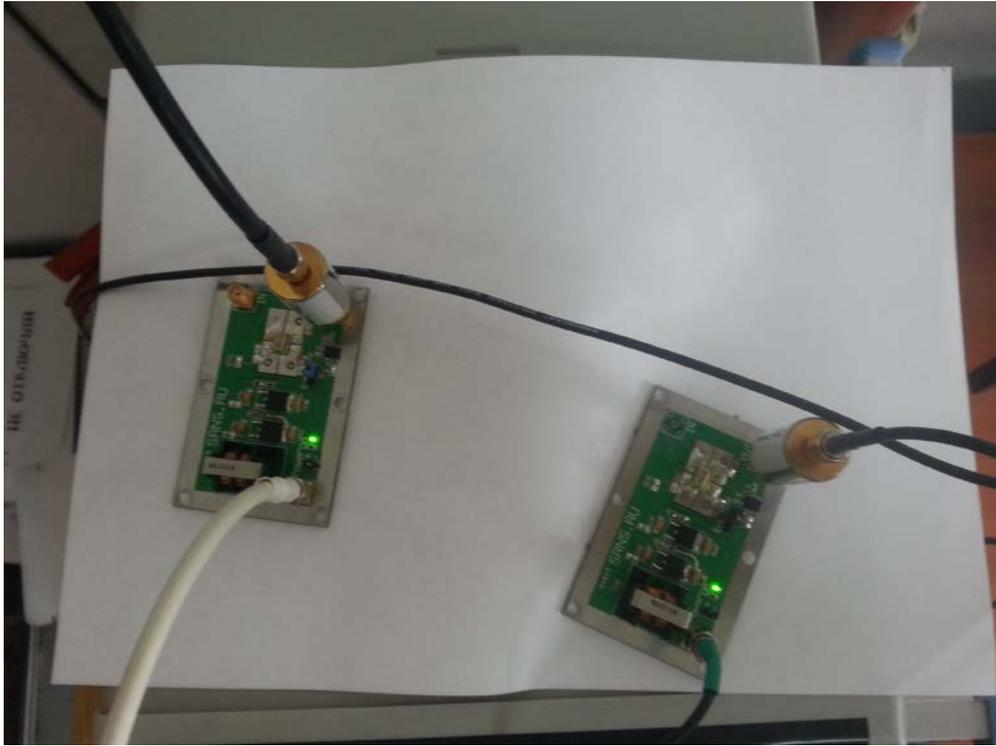


Рисунок 3.2 – Внешний вид плат оснастки ОГ

- 3) Настроить smj-100A на работу от внешнего ОГ, как показано на рисунке.  
Setup → Reference Oscillator → Source → External

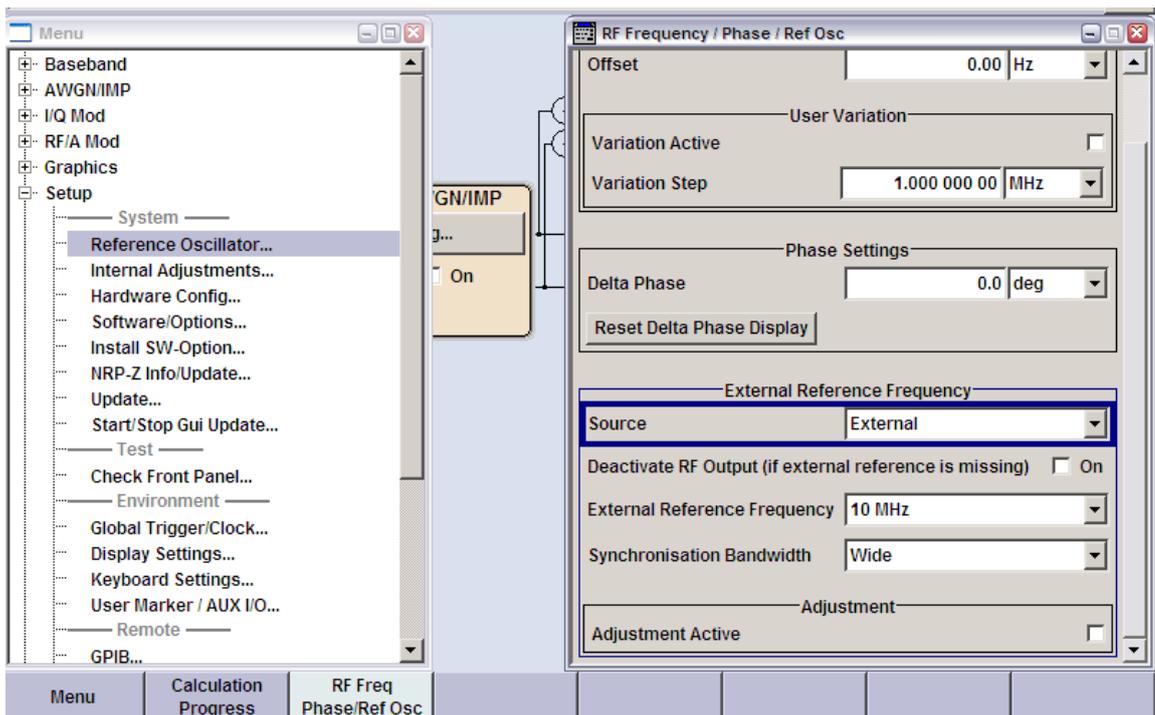


Рисунок 3.3 – настройка smj-100A на работу от внешнего ОГ

4) Выставить частоту и уровень сигнала на smj-100A

Frequency → 1602MHz.

Level → 0 dBm.

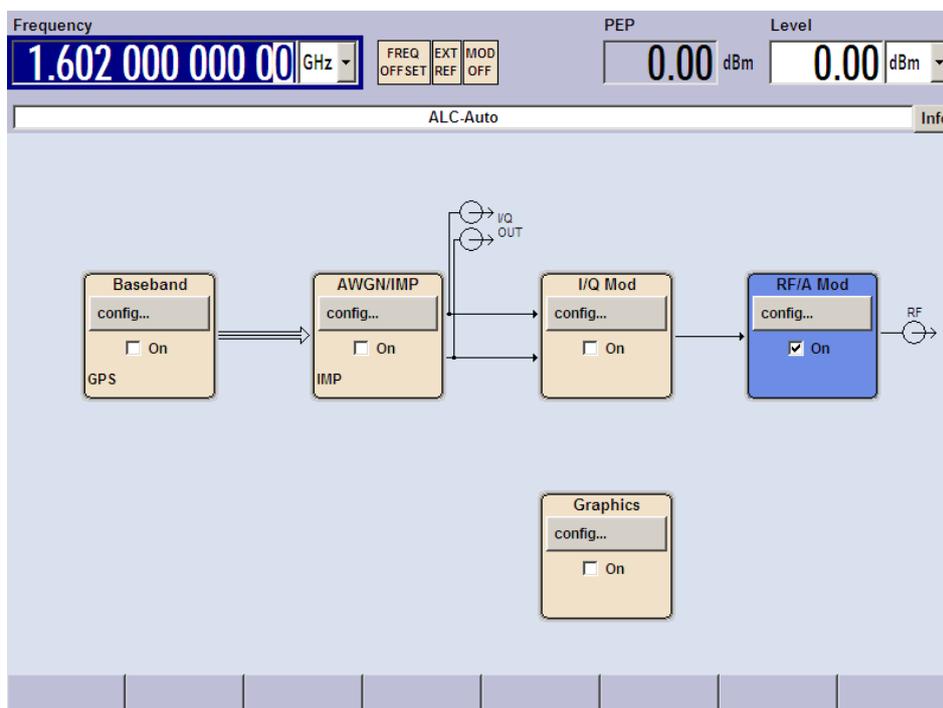


Рисунок 3.4 – Частота и уровень сигнала smj-100A

5) Настроить FSV на работу от внешнего ОГ

Setup → Reference → Ext

6) Установить несущую частоту 1602GHz на анализаторе сигналов FSV.

FREQ → 1602GHz.

7) Настроить анализатор сигналов FSV на квадратурную демодуляцию Mode → IQ входного сигнала с параметрами:

Meas → data Acquisition → Sample rate → 10.0 kHz

Meas → data Acquisition → Meas time → 1s

Проконтролировать спектр сигнала и перейти к пункту 7.

Спектр сигнала показан на рисунке 3.5.

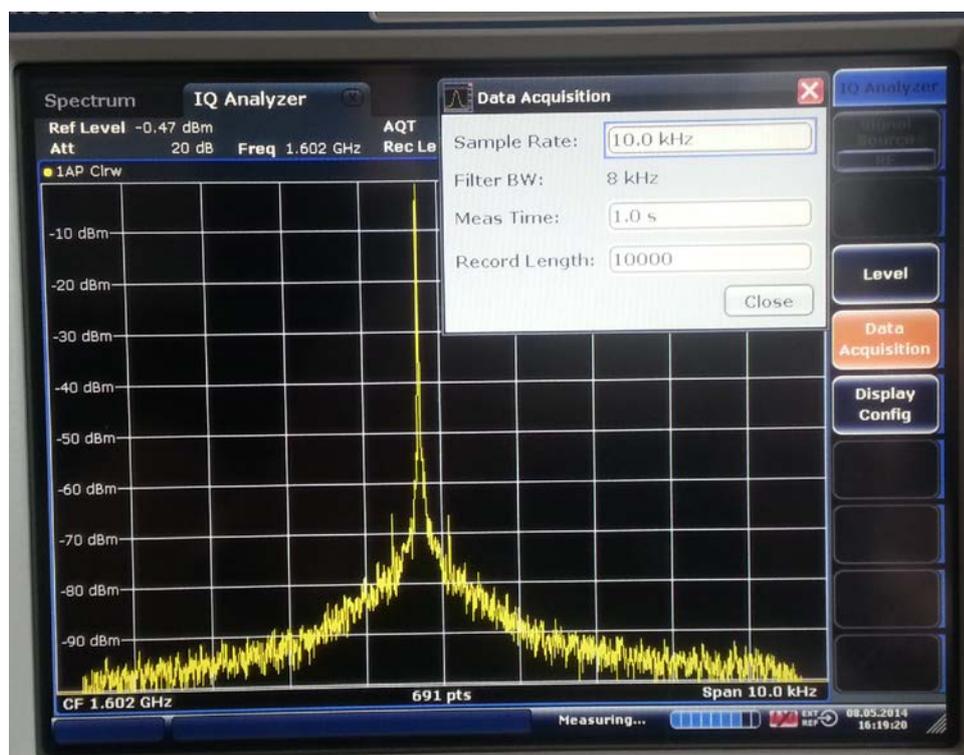


Рисунок 3.5 – Спектр и параметры для анализатора сигналов

7) Выставить Meas time → 3600с. Нажать кнопку Run cont (Run single). Дождаться пока в статусной строке появится надпись Ready (время ожидания 1 час).

8) Снять выборку отсчётов I/Q сигнала вида(2) с прибора, как показано на рисунке 3.6.

Save → Export → I/Q Export → в окне проводника выбрать папку для сохранения.

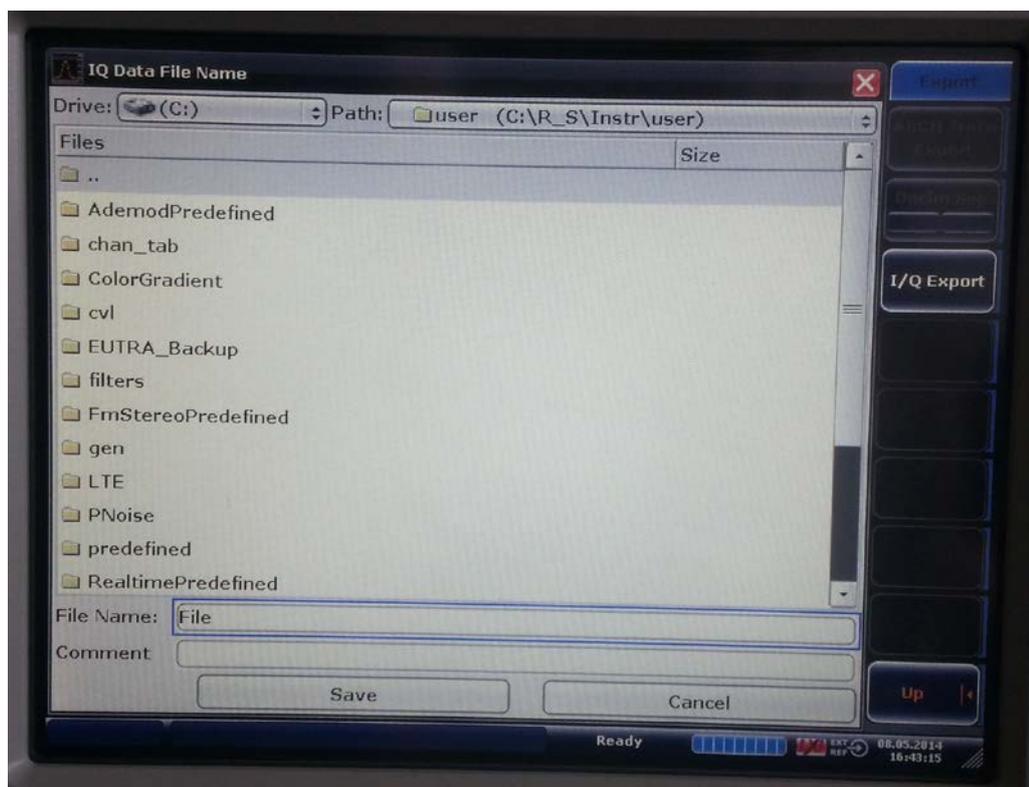


Рисунок 3.6 – Запись файла отчёта

По описанной методике был проанализирован ряд ОГ и получены соответствующие выборки, описание которых приведено в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Типы исследуемых ОГ и условия испытаний.

Марка ОГ	Тип ОГ	Имя файла	Условие	Полоса ФАП, Гц	Длительность выборки, с
ASEMP	MEMS	asemp_3600s-box	в корпусе	600 – 4500	3600
ASEMP	MEMS	asemp_3600s-open	открытый	600 – 4500	3600
ASFLMB	MEMS	asflmb-3600s-box	в корпусе	600 – 4500	3600
ASFLMB	MEMS	asflmb-3600s-open	открытый	600 – 4500	3600
C2260A1-0109	TCXO	c2260-3600-box	в корпусе	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
C2260A1-0109	TCXO	c2260-3600-open	открытый	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ГК-99-ТК	TCXO	gk99-in-box	в корпусе	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3000

ГК-99-ТК	ТСХО	gk99-open-3000s	открытый	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3000
ГК-206-ТК	ТСХО	gk206-3600s-box	в корпусе	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ГК-206-ТК	ТСХО	gk206-3600s-open	открытый	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ГК267-ТС	ОСХО	gk267ts-3600s-open	–	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ГТХО-83	ТСХО	gtxo83-3600s-box	в корпусе	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ГТХО -83	ТСХО	gtxo83-3600s-open	открытый	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
Ч1-1007	Водородный стандарт частоты	h-h3600s-ultimate	–	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600
ОСХО	Приборный R&S	осхо-smbv-3600s	–	$1 \cdot 10^{-3} - 100$	3600

« – » поставлен для термостатированных ОГ.

#### 4. Описание разработанного ПО по обработке выборок дрейфа фазы

Для обработки снятых выборок была написана программа – `zada4abak1`.

##### Параметры настроек программы :

$F_s = 10000$  - частота дискретизации.

$F_0 = 1602.0000e6$  – центральная частота, относительно которой «производятся измерения».

$T_{vib} = 3600$  – время выборки.

$IQ\_FILE = './gk206-3600s-open.complex.1ch.float32'$  - файл с выборкой отсчётов комплексного сигнала (1).

$N = T_{vib} \cdot F_s$  – количество точек в выборке.

$N_b = 10000$  - параметр позволяющий выводить на экран получившийся график через 10000 точек, т.е через 1 секунду.

$BW = [0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100]$  – набор полос пропускания систем ФАП.

$PLLorder = 2$  - порядок системы ФАП.

Программа основана на параллельном имитационном моделировании множества систем ФАП с шумовыми полосами пропускания, задаваемыми массивом  $BW$ .

Дискриминатор каждой системы ФАП описывается следующим выражением:

$$U_{\tilde{a},k} = \text{Im} \left( \frac{I_k + jQ_k}{A} \cdot e^{-j\tilde{\varphi}_{on,k}} \right), \quad (4)$$

где  $Q_k$  и  $I_k$  - отсчёты комплексного сигнала вида (1), поступающего из выборки  $IQ\_FILE$ ;  $U_{\tilde{a}}$  - выход дискриминатора;  $A$  - оценка амплитуды комплексного сигнала вида (2),  $A = \sqrt{M[I_k^2 + Q_k^2]}$ ;  $\tilde{\varphi}_{on,k}$  - экстраполированная оценка разности фаз ОГ из фильтра системы ФАП.

Фильтр каждой системы ФАП для случая использования ФАП третьего порядка описывается уравнениями:

1) Уравнения экстраполяции:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{on,k} &= \hat{\varphi}_{k-1} + \hat{\omega}_{k-1} \cdot T + \hat{\upsilon}_{k-1} \cdot \frac{T^2}{2}, \\ \tilde{\omega}_{k-1} &= \hat{\omega}_{k-1} + \hat{\upsilon}_{k-1} \cdot T, \\ \tilde{\upsilon}_{k-1} &= \hat{\upsilon}_{k-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

2) Уравнения фильтрации:

$$\begin{aligned}\hat{\varphi}_k &= \tilde{\varphi}_{on,k} + K_1 \cdot U_{\partial,k}, \\ \hat{\omega}_k &= \tilde{\omega}_k + K_2 \cdot U_{\partial,k}, \\ \hat{v}_k &= \tilde{v}_k + K_3 \cdot U_{\partial,k},\end{aligned}\tag{6}$$

где  $T$ -шаг дискретизации;  $\hat{\varphi}_{k-1}$  - оценка фазы в  $k-1$  момент времени;  $\tilde{\omega}_{k-1}$  - экстраполированная оценка частоты;  $\hat{\omega}_{k-1}$  - оценка частоты в  $k-1$  момент времени;  $\tilde{v}_{k-1}$  - экстраполированная оценка ускорения фазы ОГ из фильтра системы ФАП;  $\hat{v}_{k-1}$  - оценка ускорения фазы в  $k-1$  момент времени;  $K_1, K_2, K_3$  - коэффициенты фильтра,  $K_3 = (1.2 \cdot \Delta F_{\text{ФАП}})^3$ ;  $K_2 = 2 \cdot T \cdot (1.2 \cdot \Delta F_{\text{ФАП}})^2$ ;  $K_1 = 2,4 \cdot T \cdot \Delta F_{\text{ФАП}}$ .

Фильтр каждой системы ФАП для случая использования ФАП второго порядка описывается следующими уравнениями.

1) Уравнения экстраполяции:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}_k &= \hat{\varphi}_{k-1} + \hat{\omega}_{k-1} \cdot T \\ \tilde{\omega}_k &= \hat{\omega}_{k-1}\end{aligned}\tag{7}$$

2) Уравнения фильтрации:

$$\begin{aligned}\hat{\varphi}_k &= \tilde{\varphi}_{on,k} + K_1 \cdot U_{\partial,k}, \\ \hat{\omega}_k &= \tilde{\omega}_k + K_2 \cdot U_{\partial,k},\end{aligned}\tag{8}$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты фильтра,  $K_2 = \left(\frac{\Delta F_{\text{ФАП}}}{0.53}\right)^2 \cdot T$ ;  $K_1 = 2.6 \cdot \Delta F_{\text{ФАП}} \cdot T$ .

Программа проводит имитационное моделирование множества систем ФАП, строит графики показанные на рисунке 4.1 и создаёт файл отчёта.

Пример построения графиков программой для ОГ ГК-206-ТК приведён на рисунке 4.1.

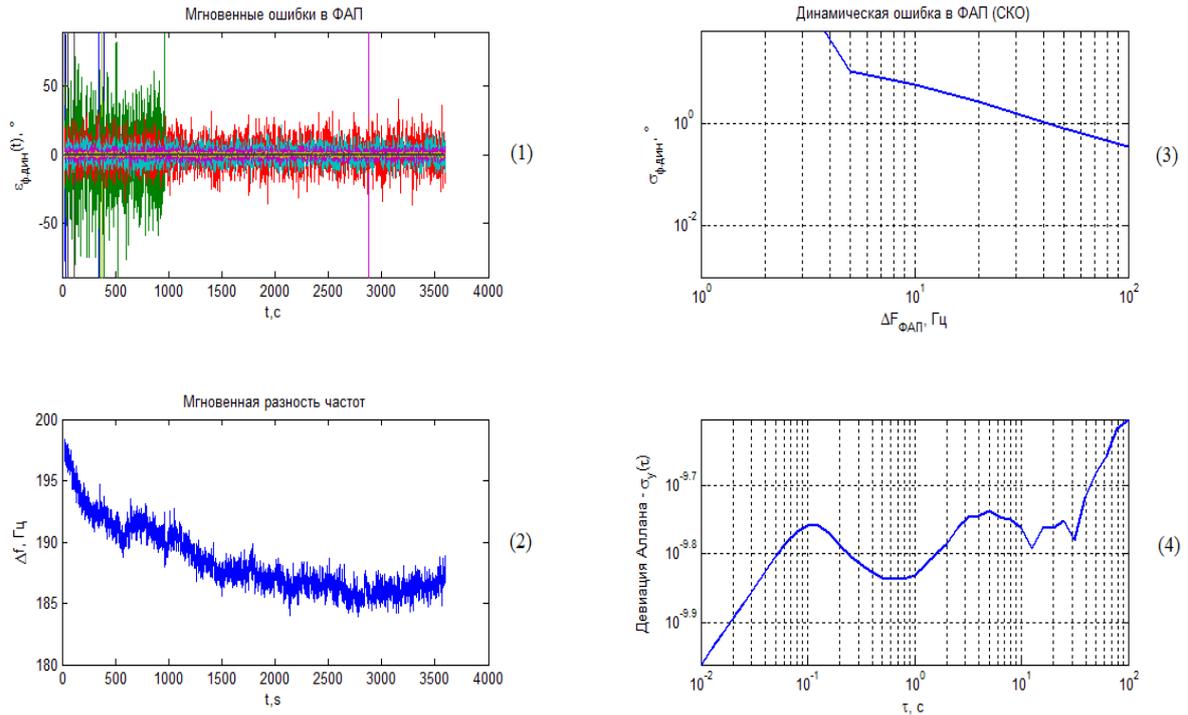


Рисунок 4.1 – Графики отчёта

- (1) - график мгновенной динамической ошибки в системе ФАП.
- (2) - график мгновенной разности частот в системе ФАП с самой широкой полосой.
- (3) - график динамической ошибки в системе ФАП.
- (4) - график девиации Аллана, рассчитанный по формуле (1).

Пример файла отчёта, снятый на ОГ ГК-206-ТК, приведён ниже.

Раздел Allan deviation отображает график девиации Аллана по точкам, раздел PLL Dynamic error – динамическая ошибка в системе ФАП по точкам.

```

Generated 25-Apr-2014 12:48:15
Data file: ./gk206-3600s-open.complex.1ch.float32
Carrier: F0 = 1.602000e+09 Hz,
Fs = 1.000000e+04 Hz,
Points 3600000 (3600.000000 s)
SNR = 81.799803 dB
Phase error: 0.060180 deg (STD)
PLL order: 3
Critical PLL BW (Q-type discriminator): n/a
Reasonable accumulation time Tacc: n/a s

```

```

Allan deviation:
tau, s          sigma_y(tau)

```

1.000000e-02	1.119111e-10
1.258925e-02	1.186669e-10
1.584893e-02	1.261817e-10
1.995262e-02	1.347188e-10
2.511886e-02	1.446393e-10
3.162278e-02	1.555160e-10
3.981072e-02	1.685065e-10
5.011872e-02	1.835534e-10
6.309573e-02	2.008132e-10
7.943282e-02	2.208804e-10
1.000000e-01	2.434009e-10
1.258925e-01	2.703407e-10
1.584893e-01	3.031882e-10
1.995262e-01	3.454055e-10
2.511886e-01	3.935926e-10
3.162278e-01	4.516852e-10
3.981072e-01	5.126711e-10
5.011872e-01	5.794767e-10
6.309573e-01	6.378291e-10
7.943282e-01	7.013763e-10
1.000000e+00	7.505213e-10
1.258925e+00	7.981018e-10
1.584893e+00	8.246564e-10
1.995262e+00	8.373180e-10
2.511886e+00	8.508706e-10
3.162278e+00	8.352534e-10
3.981072e+00	7.781244e-10
5.011872e+00	7.798610e-10
6.309573e+00	7.052718e-10
7.943282e+00	6.689180e-10
1.000000e+01	6.651634e-10
1.258925e+01	5.959828e-10
1.584893e+01	5.622656e-10
1.995262e+01	5.549511e-10
2.511886e+01	5.433631e-10
3.162278e+01	5.776719e-10
3.981072e+01	6.012963e-10
5.011872e+01	6.561987e-10
6.309573e+01	7.033976e-10
7.943282e+01	7.939095e-10
1.000000e+02	8.539745e-10

PLL Dynamic error:

PLL BW, Hz	sigma PHI ,°
1.000000e-03	6.348567e+07
3.000000e-03	6.348565e+07

1.000000e-02	6.348502e+07
3.000000e-02	6.347411e+07
1.000000e-01	6.296140e+07
2.000000e-01	5.429993e+07
5.000000e-01	2.980779e+07
1.000000e+00	7.376125e+07
2.000000e+00	9.532948e+08
5.000000e+00	4.135613e+09
1.000000e+01	7.092367e+00
2.000000e+01	2.809686e+00
5.000000e+01	8.306654e-01
1.000000e+02	3.455769e-01

## 5. Результаты исследований динамической ошибки в системах ФАП при различных ОГ

В результате предварительной обработки выборок по методике п.4 были получены графики девиации Аллана и зависимость динамической ошибки от полосы ФАП для ФАП второго и ФАП третьего порядка при двух условиях съёма – в корпусе и без корпуса.

На рисунке 5.1 показан вид макета изолирующего корпуса в котором снимались выборки дрейфа фазы ОГ при условии наличия корпуса. Внутри находится поролон, который не позволяет воздуху циркулировать внутри коробки, поэтому температуру кристалла кварца ОГ в этой коробке можно считать постоянной.



Рисунок 5.1- Макет изолирующего корпуса

Графики девиации Аллана и зависимость динамической ошибки от полосы ФАП для ФАП второго и ФАП третьего порядка приведены на рис 5.1 – 5.6.

Для ОГ GTXO-83, работающих по технологии ТСХО , графики представлены на рис.5.1

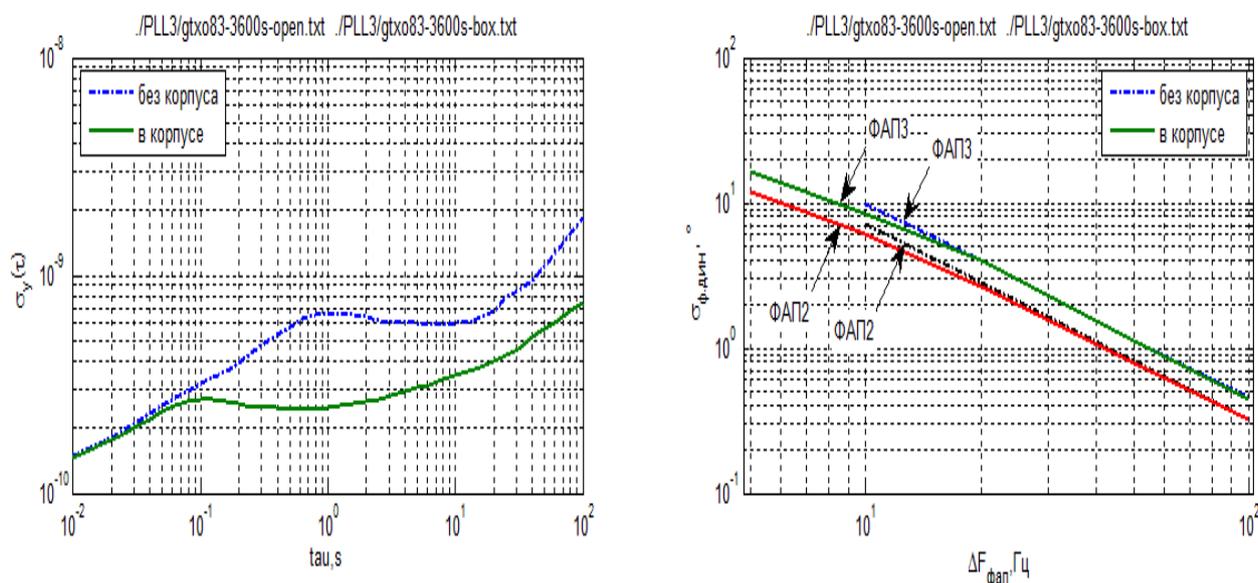


Рисунок 5.1- Девиация Аллана для GTXO-83 (слева), зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП для GTXO-83 (справа).

Для ОГ gk99, работающих по технологии ТСХО график девиации Аллана и зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП представлены на рис.5.2

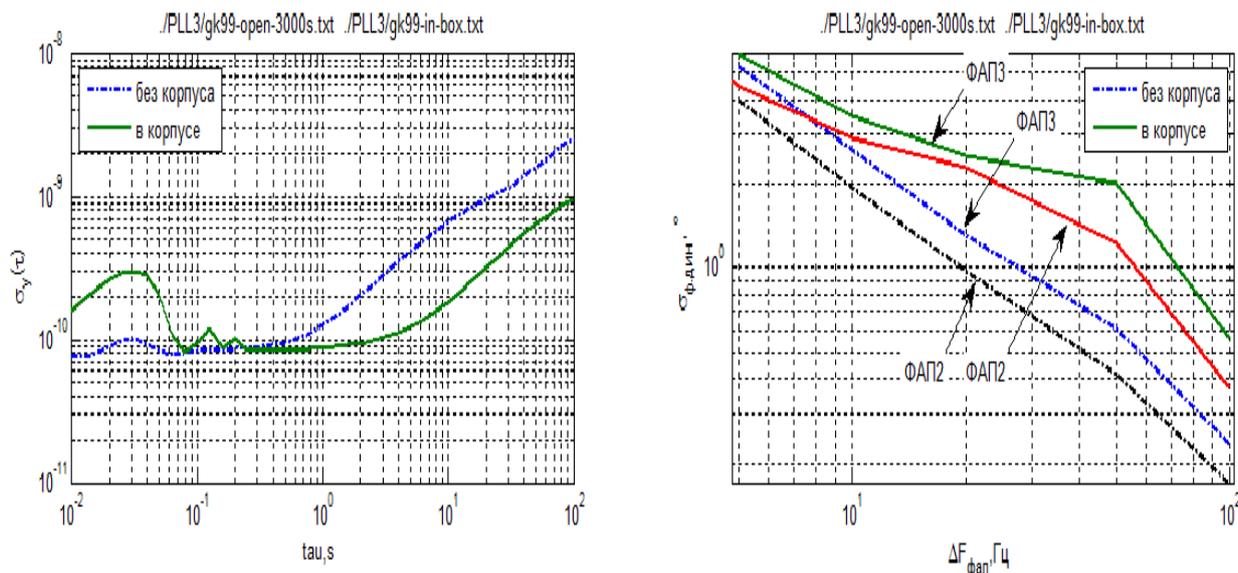


Рисунок 5.2- Девиация Аллана для gk99 (слева), зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП для gk99 (справа).

Для ОГ gk206, работающих по технологии ТСХО график девиации Аллана и зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП представлены на рис.5.3

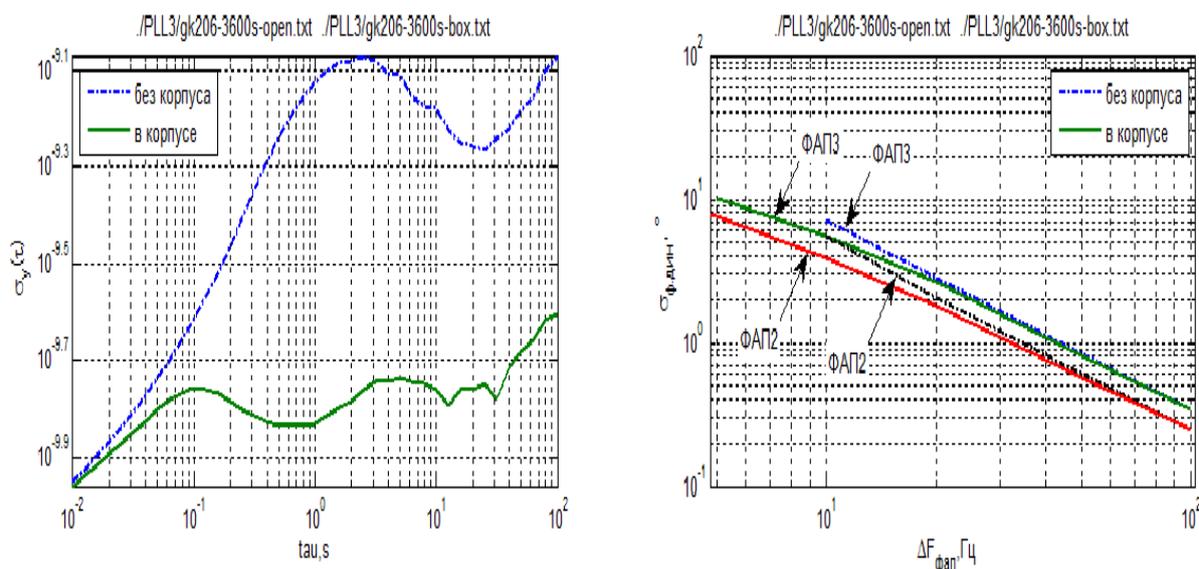


Рисунок 5.3- Девиация Аллана для gk206 (слева), зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП для gk206 (справа).

Для ОГ с2260, работающих по технологии ТСХО график девиации Аллана и зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП представлены на рис 5.4

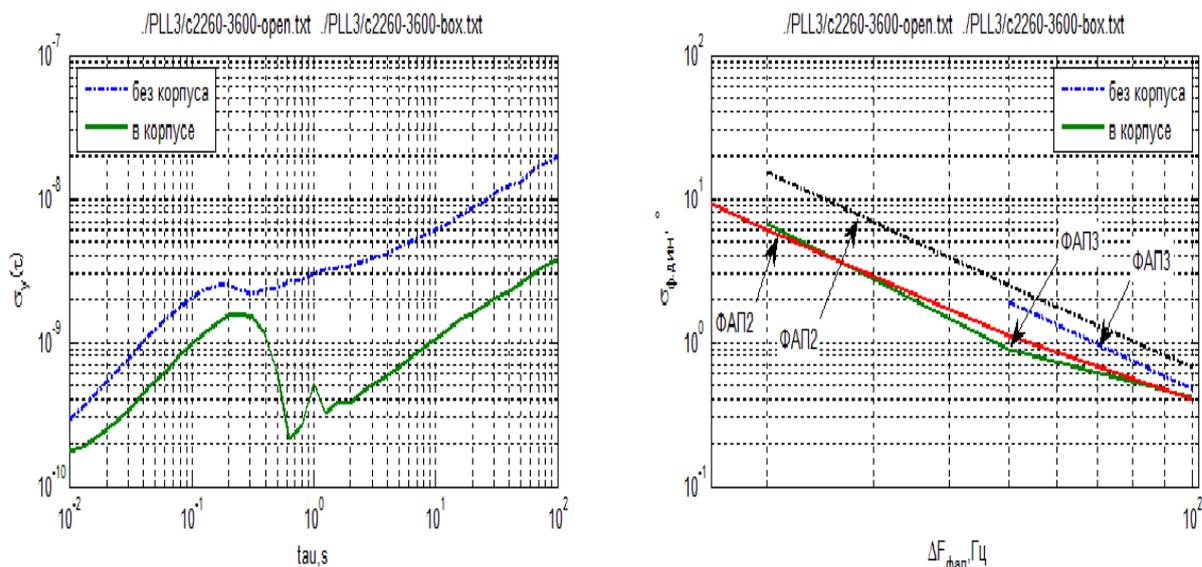


Рисунок 5.4- Девиация Аллана для с2260 (слева), зависимость динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП для с2260 (справа).

Для всех опорных генераторов кроме с2260, работающих по технологии ТХСО выявлено, что для системы ФАП второго порядка обеспечивает меньшую динамическую ошибку при слежении за фазой ОГ. По графикам можно проанализировать, что для системы ФАП второго порядка среднеквадратическая ошибка примерно на 50% (в 1.5 раза) меньше чем в системе ФАП третьего порядка.

Далее приведены результаты для следующих ОГ: приборного R&S, ГК267-ТС и Ч1-1007.

Приборный R&S и ГК267-ТС - ОГ работающие по технологии ОСХО.

Ч1-1007 – водородный стандарт частоты.

Для перечисленных ОГ графики девиации Аллана и зависимости динамической ошибки в системе ФАП от полосы ФАП представлены на рис 5.5 и рис 5.6:

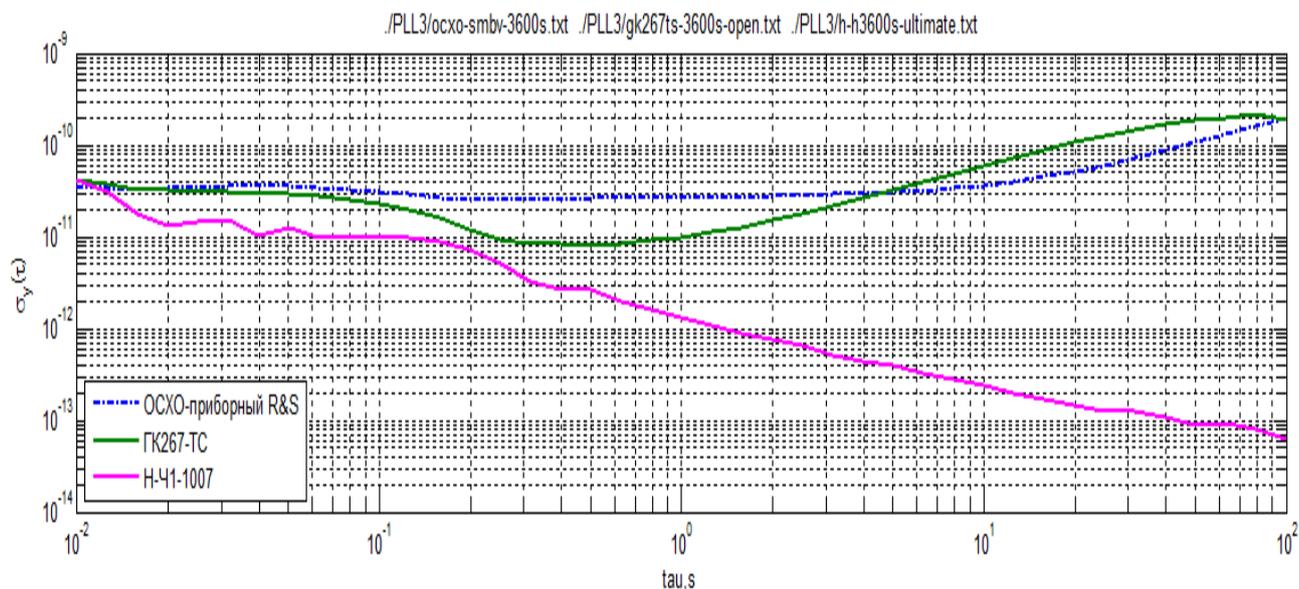


Рисунок 5.5— Девиация Аллана

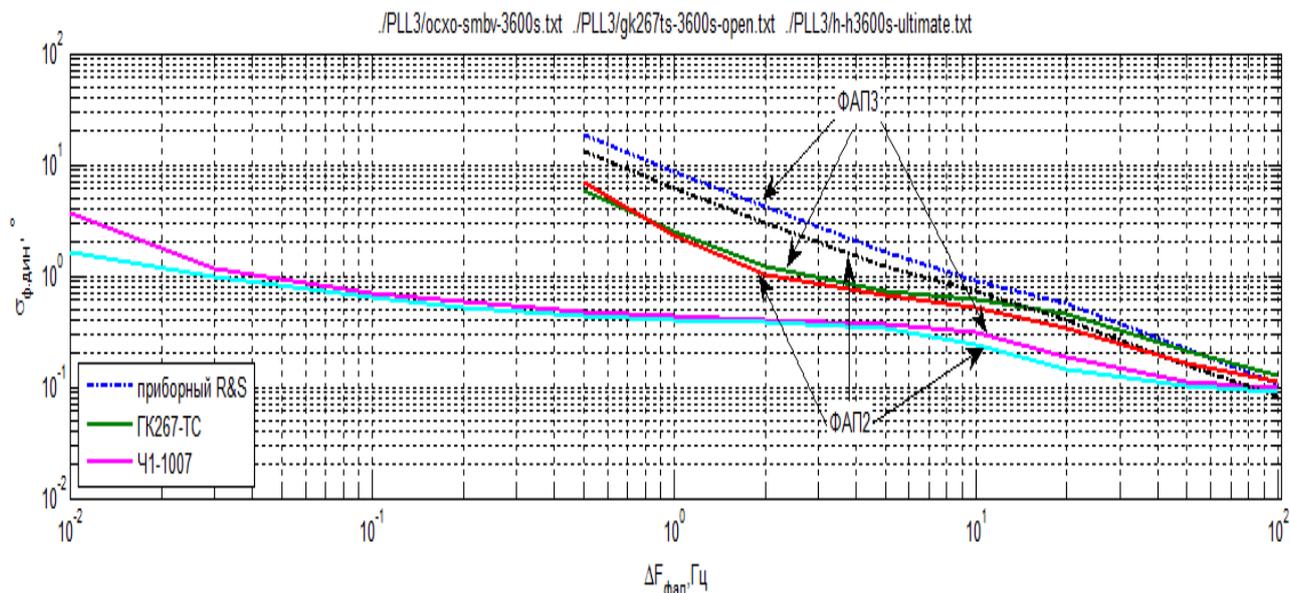


Рисунок 5.6 – Зависимость динамической ошибки в системе ФАП второго порядка и ФАП третьего порядка от полосы ФАП

Из графиков видно, что для ОГ, работающих как по технологии ОСХО так и для водородного стандарта частоты динамическая ошибка для систем ФАП второго порядка ниже чем для систем ФАП третьего порядка.

По итогам совокупного анализа снятых выборок получены зависимости динамической ошибки от девиации Аллана для ОГ работающих по технологиям ТСХО, ОСХО и водородного стандарта частоты.

Графики представлены на рис 5.7 (при  $\tau = 1c, \Delta F_{\phi an} = 10, 20, 50 Гц$ ) и рис 5.8 (при  $\Delta F_{\phi an} = 10, \tau = 0.1c, 1c, 10c$ )

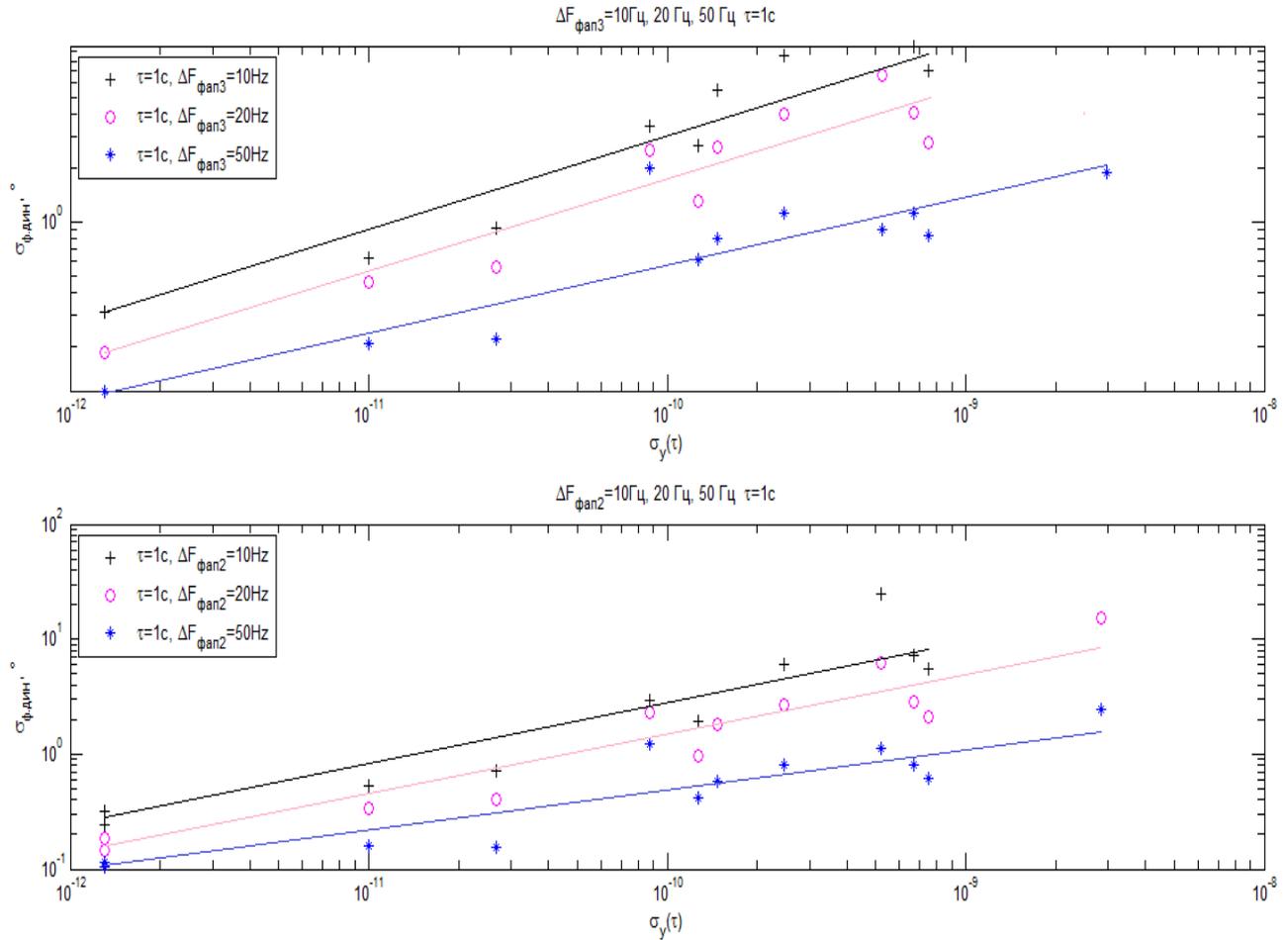


Рисунок 5.7 - Зависимость динамической ошибки от девиации Аллана для ФАП второго порядка(нижний график) и ФАП третьего порядка(верхний график) при различной полосе ФАП(10Гц, 20Гц, 50Гц)

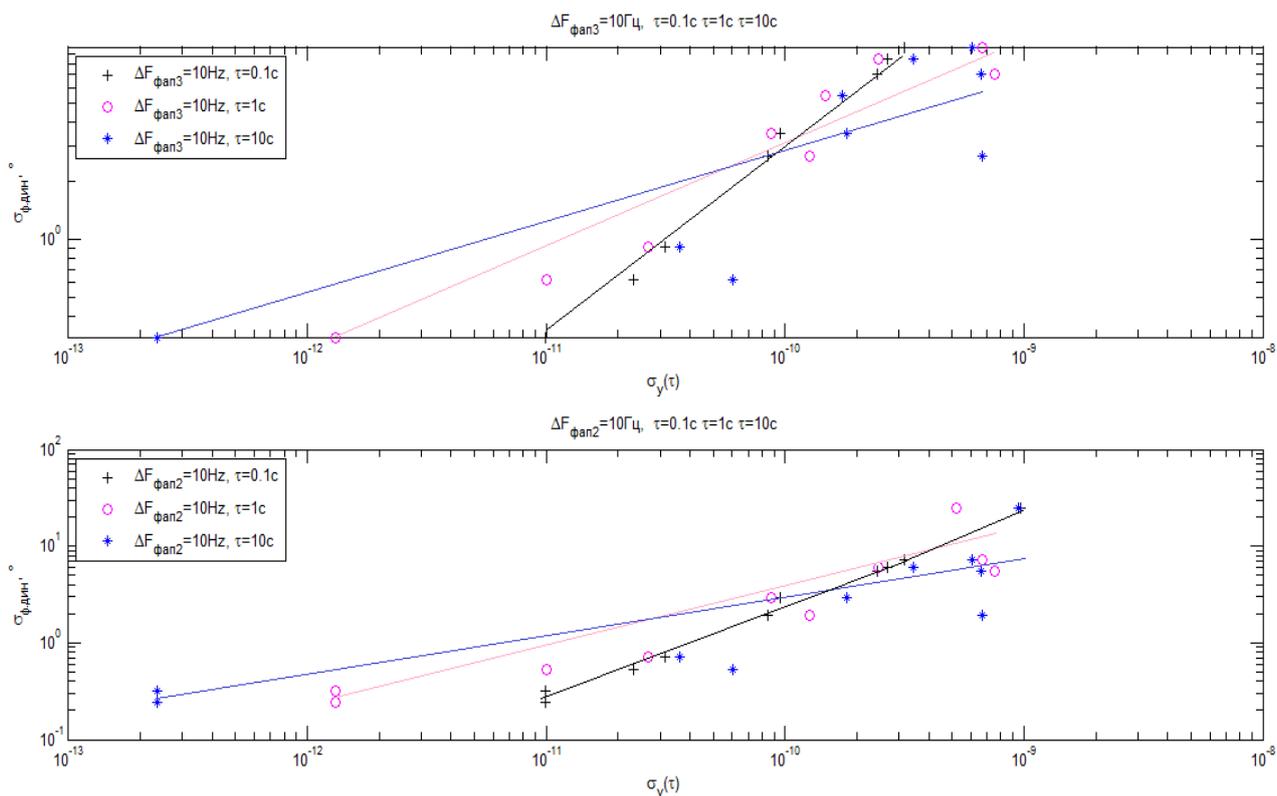


Рисунок 5.8 - Зависимость динамической ошибки от девиации Аллана для ФАП второго порядка(нижний график) и ФАП третьего порядка(верхний график) при различном времени усреднения (0.1с, 1с, 10с)

Зависимость динамической ошибки от девиации Аллана в логарифмическом масштабе носит практически линейный характер настолько насколько это можно предположить исходя из имеющейся статистики, однако из-за того, что объём статистики небольшой (было проанализировано 11 различных выборок ОГ) более точного заключения сделать невозможно.

Рисунки 5.7 и 5.8 дают наглядное представление о том, что зависимость динамической ошибки от девиации Аллана как при различной полосе ФАП, так и при различном времени усреднения имеет линейный характер и используемая полоса частот системы ФАП влияет на абсолютный уровень динамической ошибки. Для системы ФАП второго порядка полученные значения имеют меньшую динамическую ошибку по сравнению с ФАП третьего порядка. Экспериментально установлено, что время усреднения влияет на наклон (крутизну) получившейся характеристики. Чем меньше время усреднения, тем круче наклон характеристики.

МЭМС ОГ позиционируются для цифровых вычислительных систем, как генераторы обладающие сверхнизким джиттером и устойчивостью к внешним воздействиям. Была проанализирована возможность использования MEMS генераторов в приёмниках спутниковой навигации. Генераторы были исследованы

по той же методике п.4, что и генераторы ТХСО и ОСХО, но в итоге не удалось получить зависимость динамической ошибки от полосы ФАП, потому что происходят срывы слежения за фазой ОГ при любой полосе ФАП от 0 до 4кГц, что проиллюстрировано на рисунке 5.9:

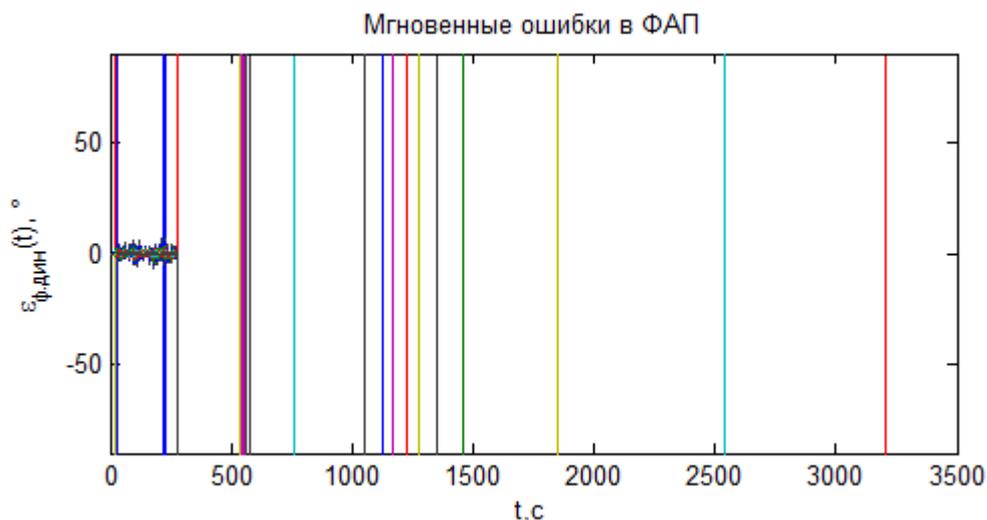


Рисунок 5.9 – Мгновенные ошибки в системе ФАП для ОГ ASFLMB.

Полученные графики девиации Аллана для генераторов ASFLMB и ASEMP приведены на рисунках 5.10 и 5.11

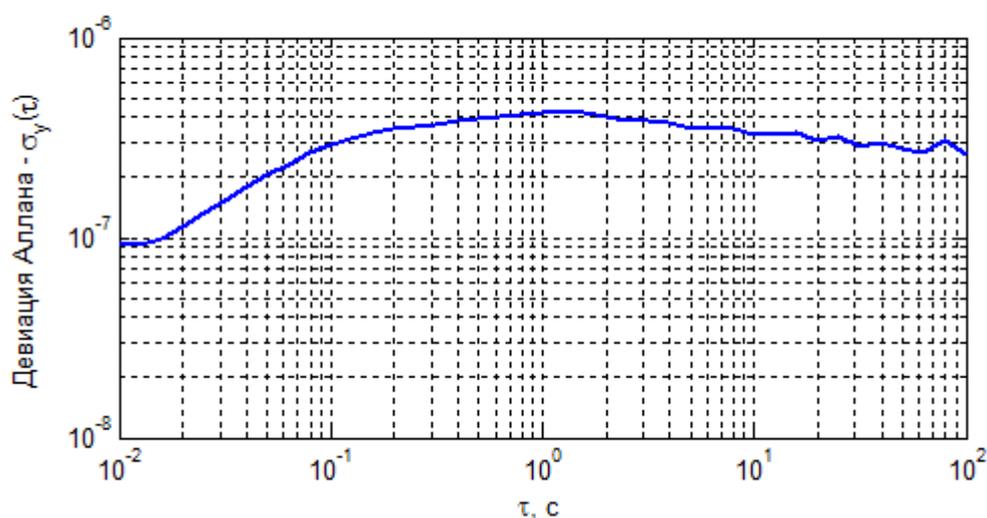


Рисунок 5.10 – Девиация Аллана для ASFLMB

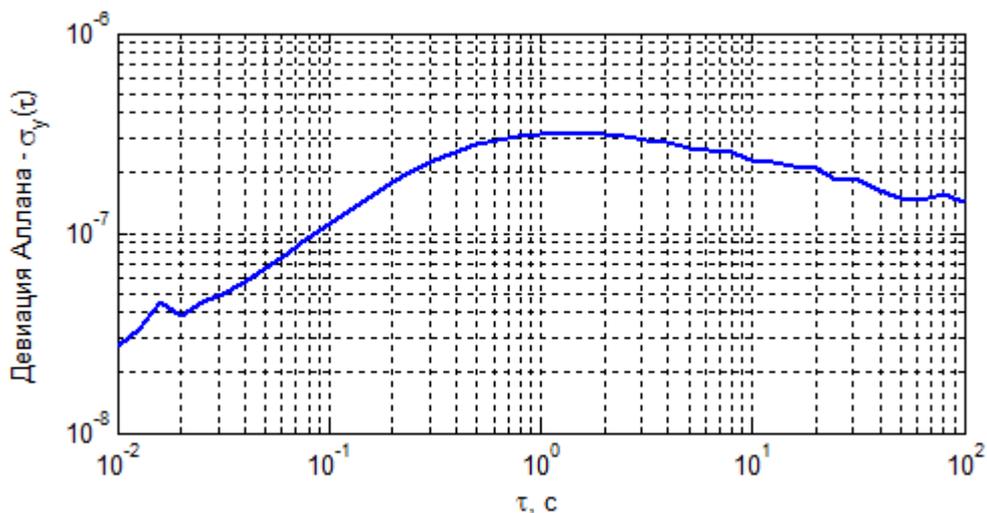


Рисунок 5.11 – Девиация Аллана для ASEMP

Для ОГ на основе МЭМС девиация Аллана на порядки больше, чем у ТСХО.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что опорные генераторы работающие по технологии МЭМС имеют настолько высокую кратковременную нестабильность частоты и большую девиацию Аллана, что они не пригодны для использования в радионавигационном приёмнике, т.е они даже не обеспечивают работоспособность систем ФАП.

## Заключение

В процессе исследований были найдены зависимости динамической ошибки в системах автоподстройки (ФАП) от девиации Аллана различных ОГ, применяемых в НАП СРНС.

Выявлено, что ФАП второго порядка обеспечивает меньшую динамическую ошибку при слежении за фазой ОГ чем ФАП третьего порядка.

Для ФАП второго порядка зависимость динамической ошибки от девиации Аллана имеет меньший разброс точек (значений) по сравнению с ФАП третьего порядка и имеет линейный характер в логарифмическом масштабе. При таком небольшом объёме статистики (было проанализировано 11 различных выборок ОГ ) невозможно (трудно) засечь нелинейность, даже если она присутствует.

Экспериментально установлено, что  $\sigma_{\varphi}(\sigma_y)$  зависит от того, для какого времени усреднения -  $\tau$  брать величину  $\sigma_y$ . Получается, что чем меньше  $\tau$ , тем больше наклон (крутизна) получившейся характеристики.

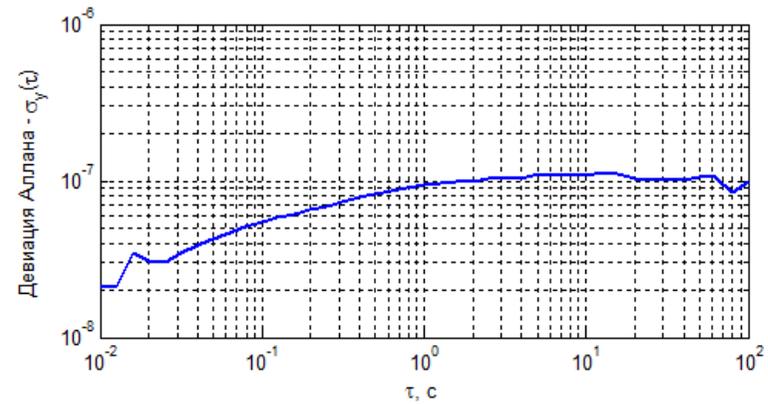
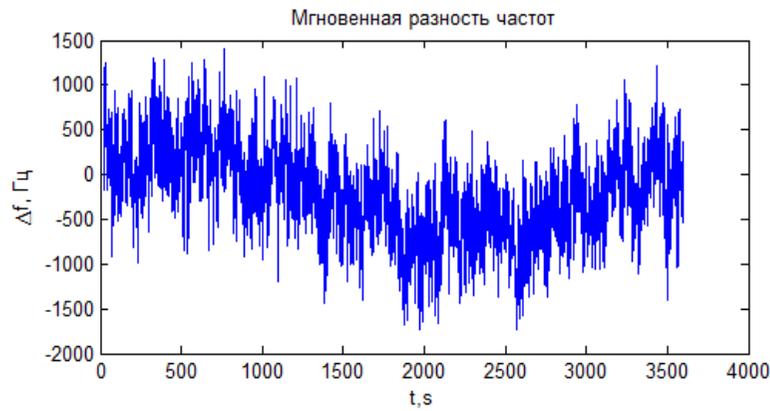
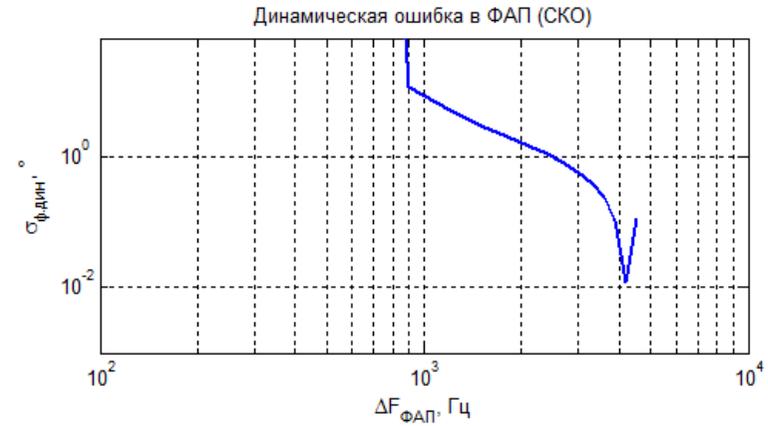
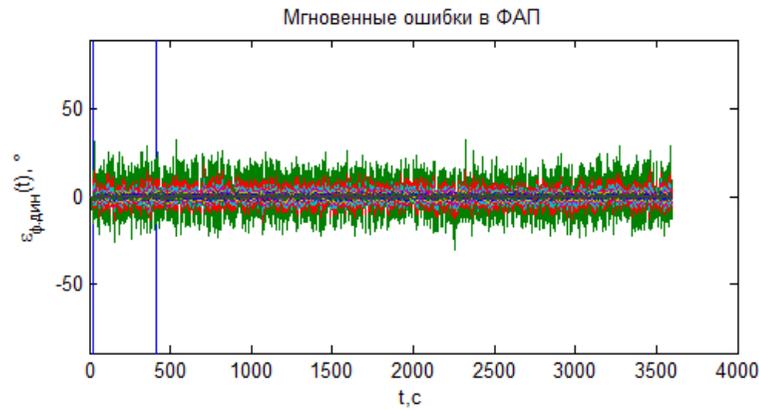
Установлено, что опорные генераторы с технологией МЭМС, имеют слишком высокую кратковременную нестабильность частоты, поэтому они не пригодны для использования в навигационном приёмнике из-за срывов слежения за фазой как в ФАП второго порядка так и в ФАП третьего порядка.

## Список литературы

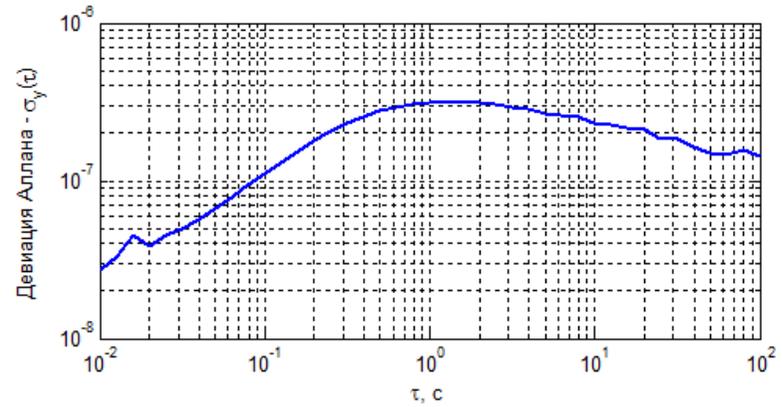
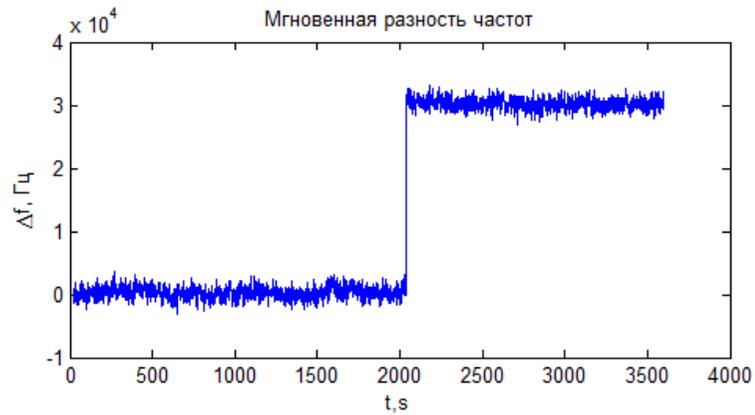
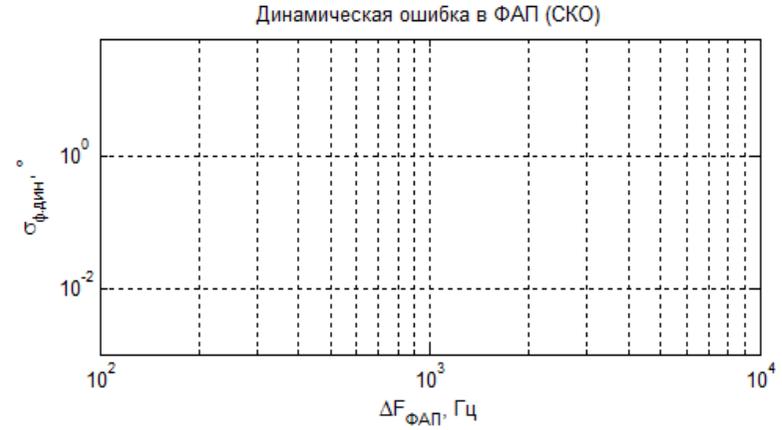
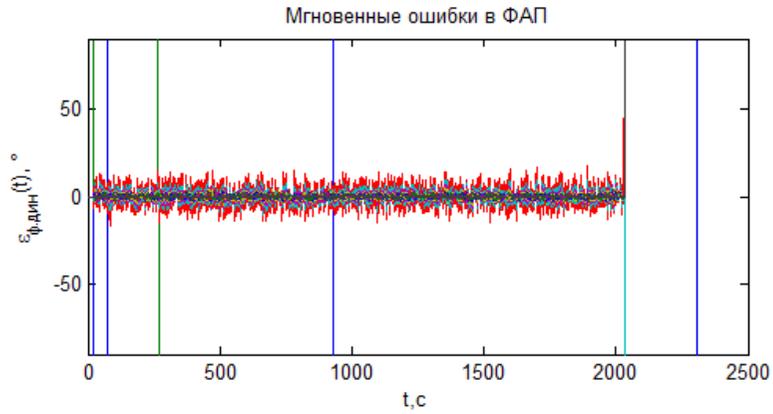
1. Ж. Рютман. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за 15 лет. // ТИИЭР, т.66, №9, сентябрь 1978 г.
2. Шатилов А.Ю., Болденков Е.Н., Липа И.В. Экспериментальные исследования ограничений времени накопления пилотной компоненты навигационных сигналов, обусловленных нестабильностью частоты опорного генератора. // Радиотехника, №7, 2013 г. - М.: Радиотехника, 2013 г., С.116-121.
3. Allan variance // Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Allan\\_variance](http://en.wikipedia.org/wiki/Allan_variance) //(28 January 2014)
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под. ред. Перова А.И., Харисова В.Н.. — изд. 4-е, перераб. и доп.. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.
5. А. И. Перов, В. Н. Замолодчиков, В. М. Чиликин. Радиоавтоматика / М.: Радиотехника, 2014, 318 с.
6. PERFORMANCE PLASTIC PACKAGE ULTRA MNINIATURE PURE SILICON™ CLOCK OSCILLATOR // <http://www.abracon.com/Oscillators/ASEMP.pdf>
7. PLASTIC PACKAGE INDUSTRIAL GRADE ULTRA MINIATURE PURE SILICON™ CLOCK OSCILLATOR // <http://www.abracon.com/Oscillators/ASFLMB.pdf>
8. VECTRON INTERNATIONAL C2260A1-0109 // <http://www.mouser.com/catalog/specsheets/C2260A1-0109.pdf>
9. МАЛОГАБАРИТНЫЙ КВАРЦЕВЫЙ ГЕНЕРАТОР ГК99-ТК // <http://www.rtk.ru/files/gk99.pdf>
10. SM TCXO CLIPPED SINE GTXO-83 // <http://www.golledge.com/pdf/products/tcxos/gtxo83.pdf>
11. Стандарт Частоты и Времени Водородный пассивного типа Ч1-1007 // <http://www.vremya-ch.com/russian/product/indexf4cc.html?Razdel=1&Id=28>
12. ПРЕЦИЗИОННЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ КВАРЦЕВЫЙ ГЕНЕРАТОР ГК267-ТС // [http://morion.com.ru/catalog\\_pdf/52,%20%D0%93%D0%9A267-%D0%A2%D0%A1.pdf](http://morion.com.ru/catalog_pdf/52,%20%D0%93%D0%9A267-%D0%A2%D0%A1.pdf)

**Приложение. Протокол обработки выборок дрейфа фазы ОГ**

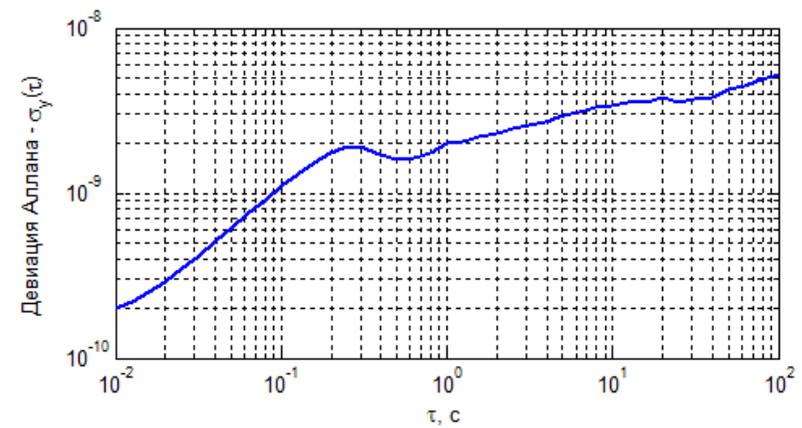
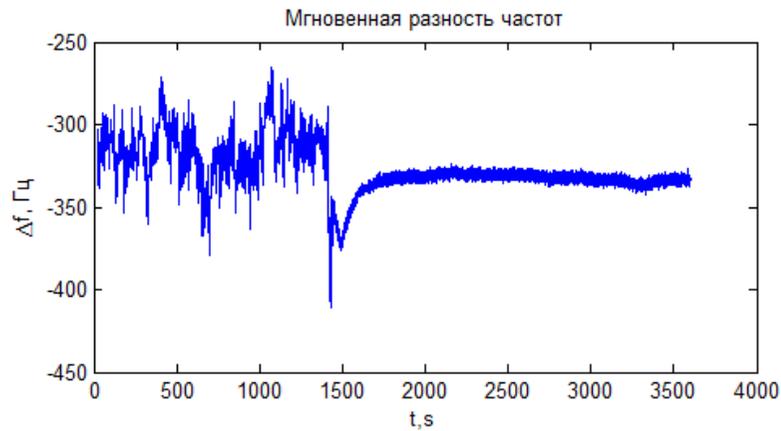
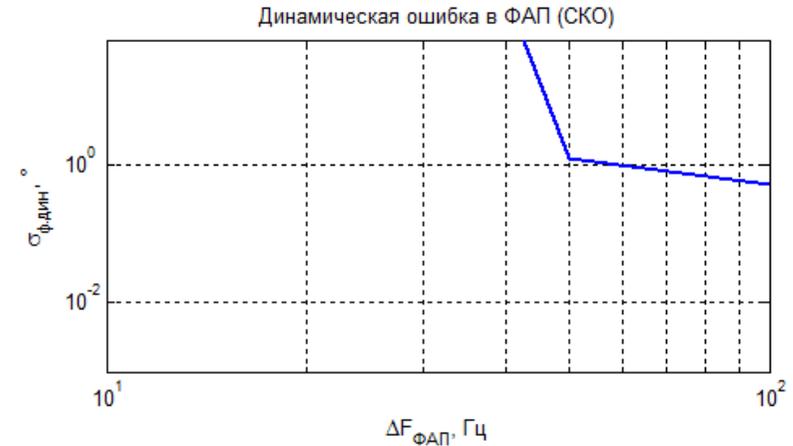
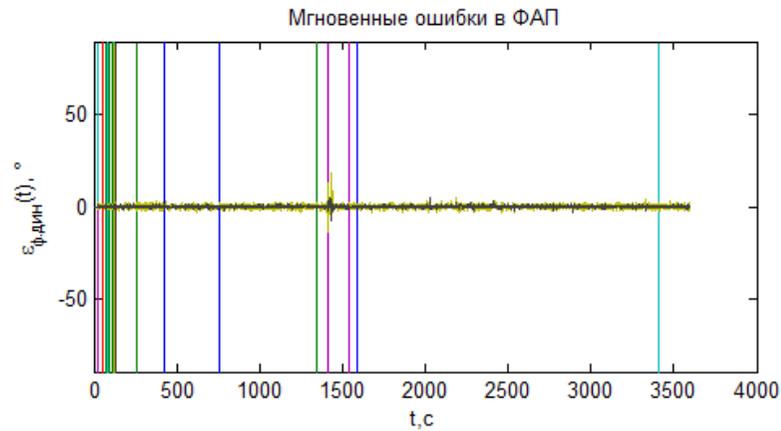
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asemp_3600s-box	mems	в корпусе	ФАП-3



Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asemp_3600s-open	mems	открытый	ФАП-3

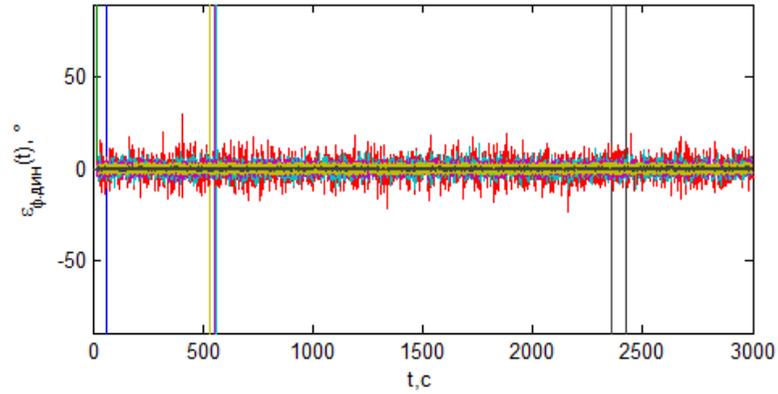


Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
c2260-3600-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-3

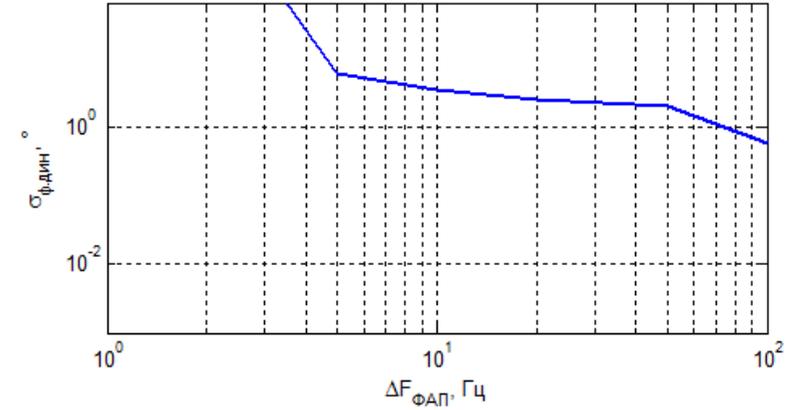


Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
c2260-3600-open	ТХСО	открытый	ФАП-3

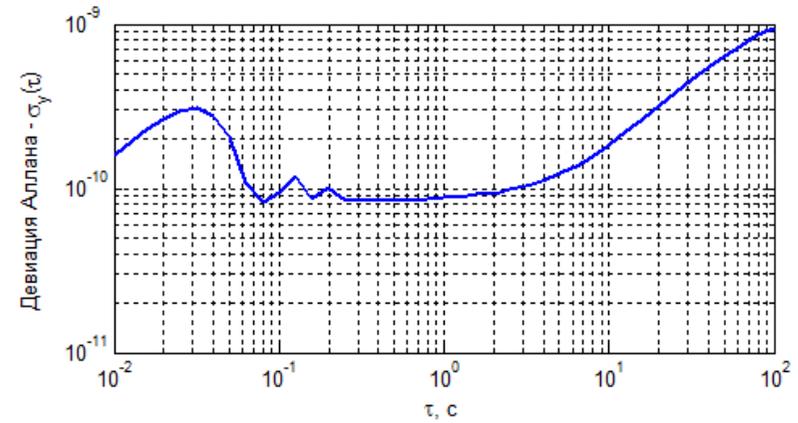
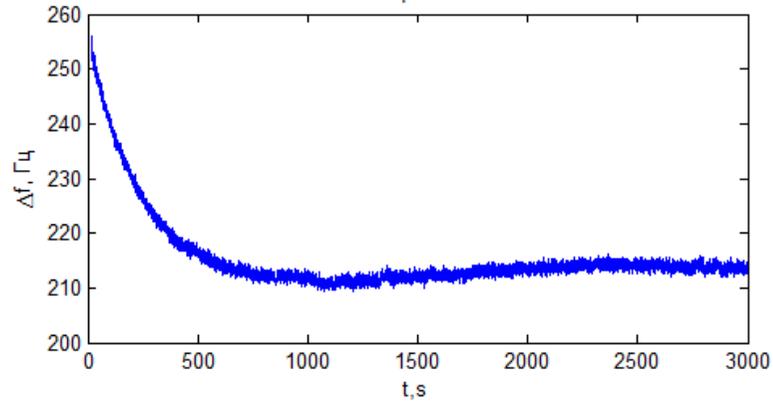
Мгновенные ошибки в ФАП



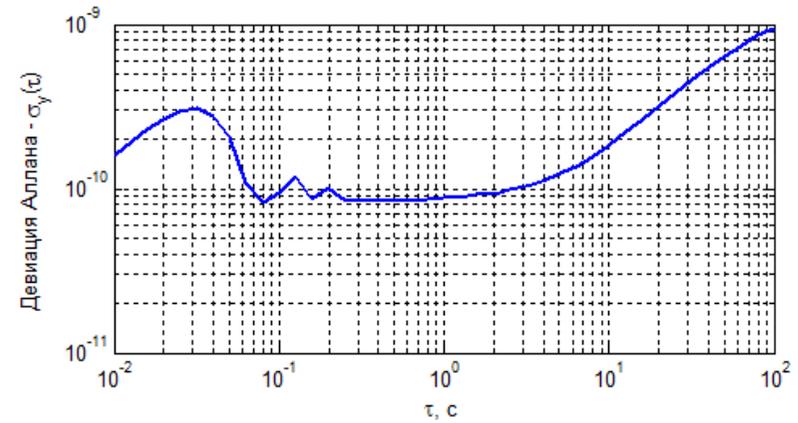
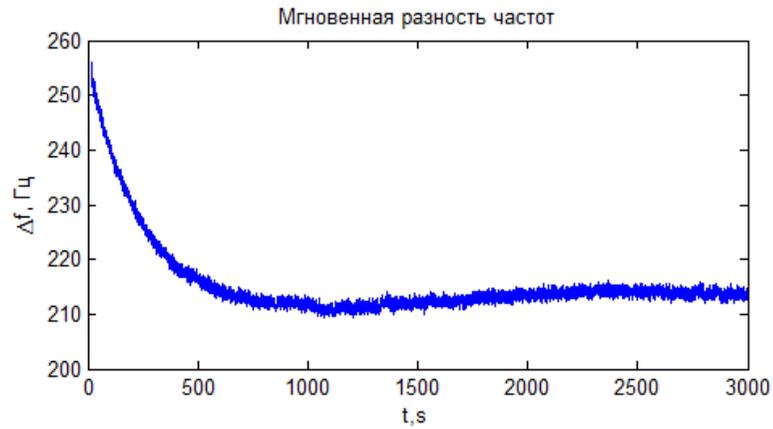
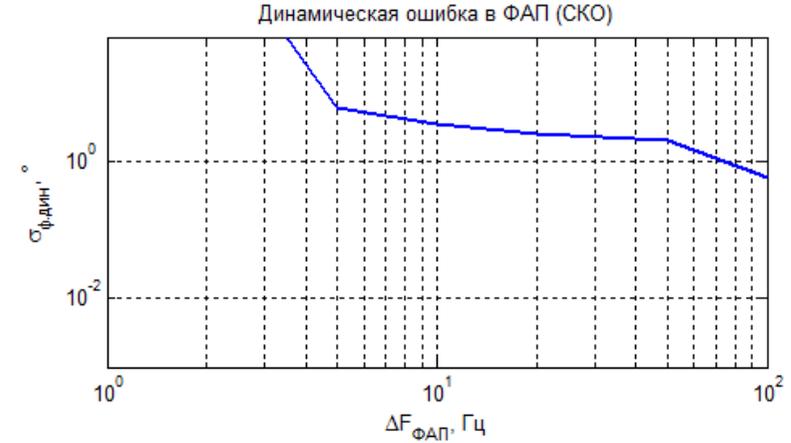
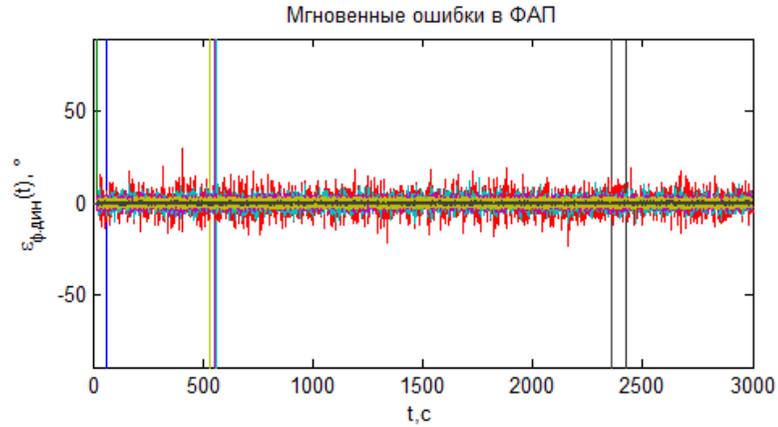
Динамическая ошибка в ФАП (СКО)



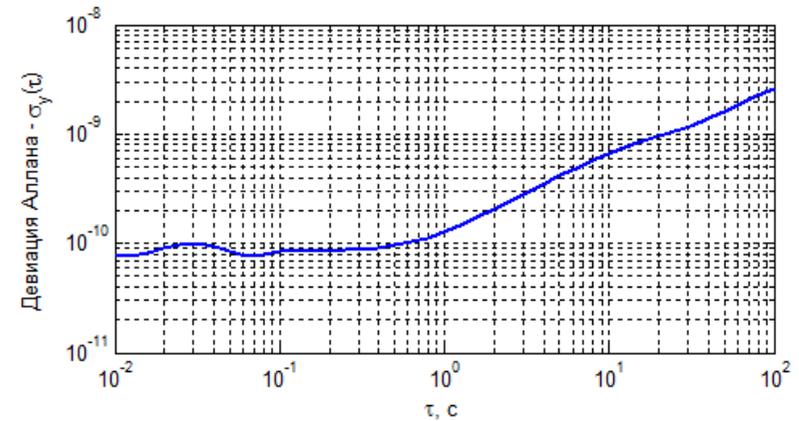
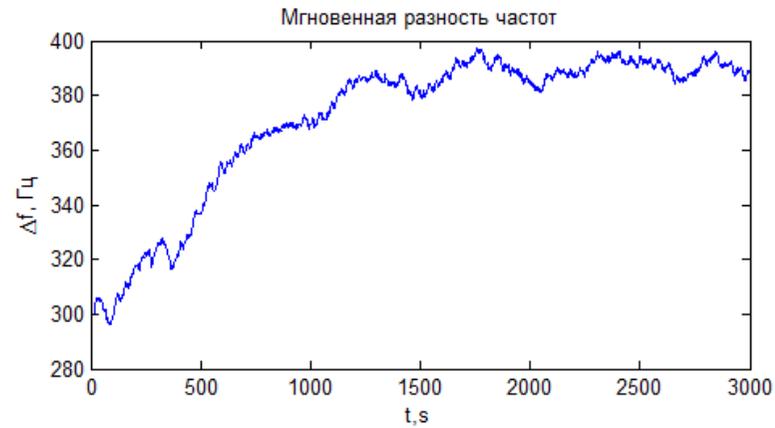
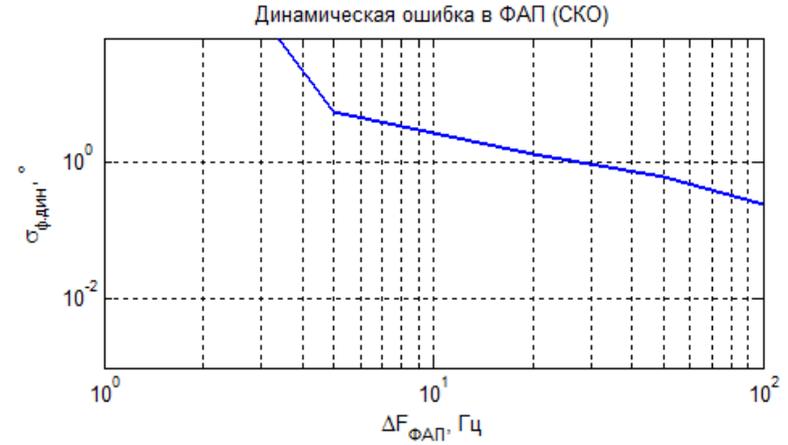
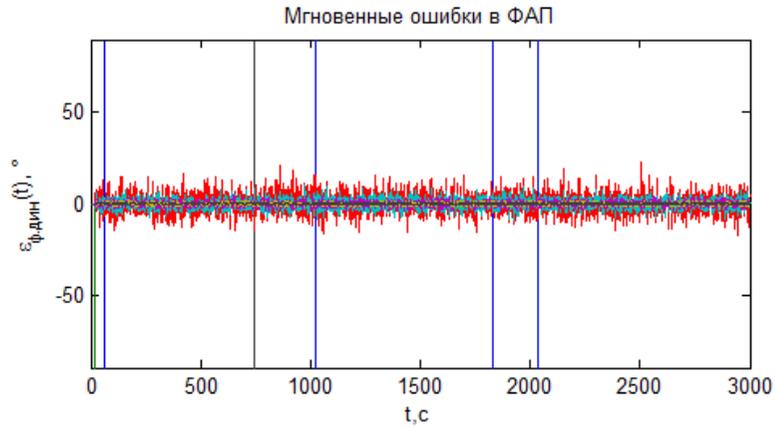
Мгновенная разность частот



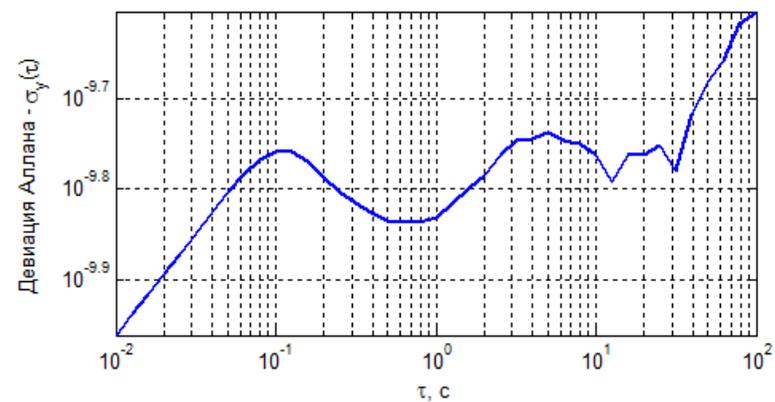
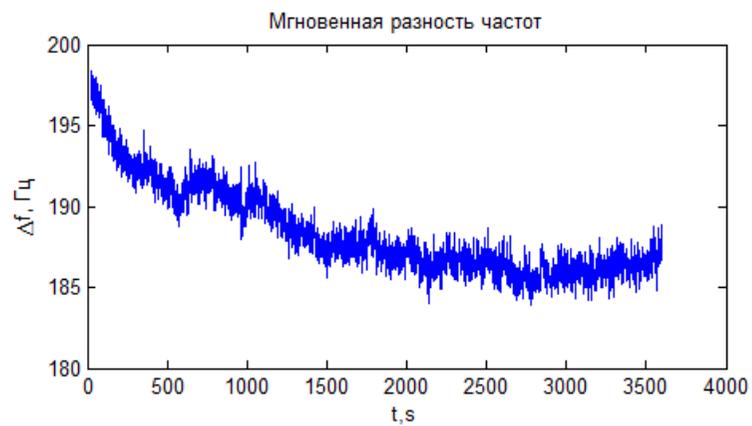
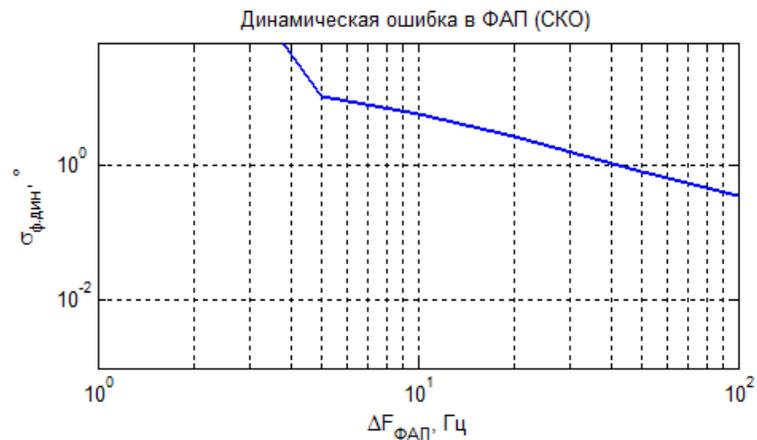
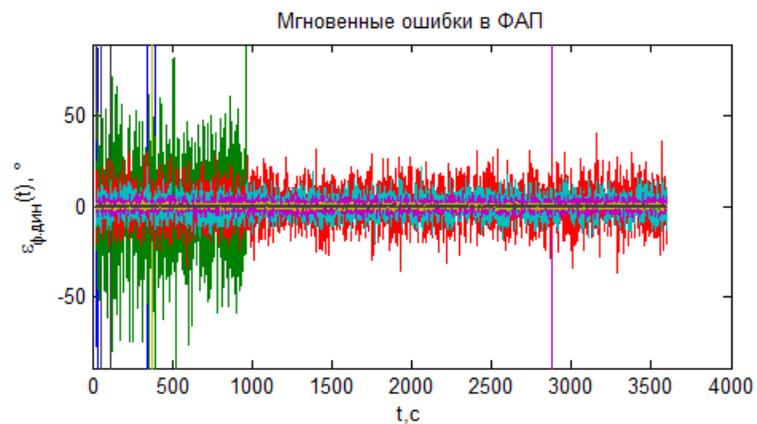
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk99-in-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-3



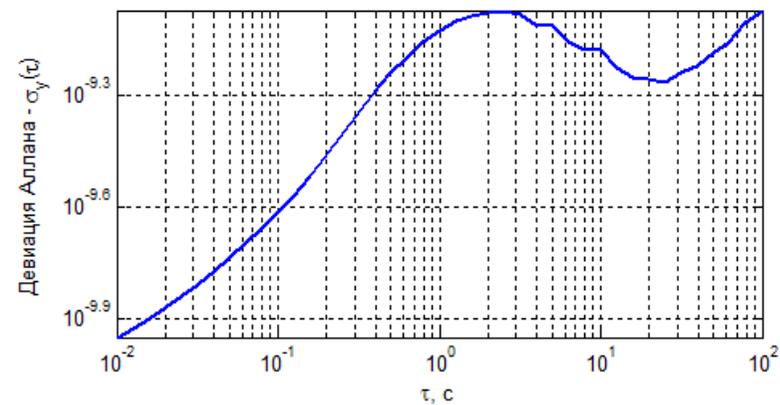
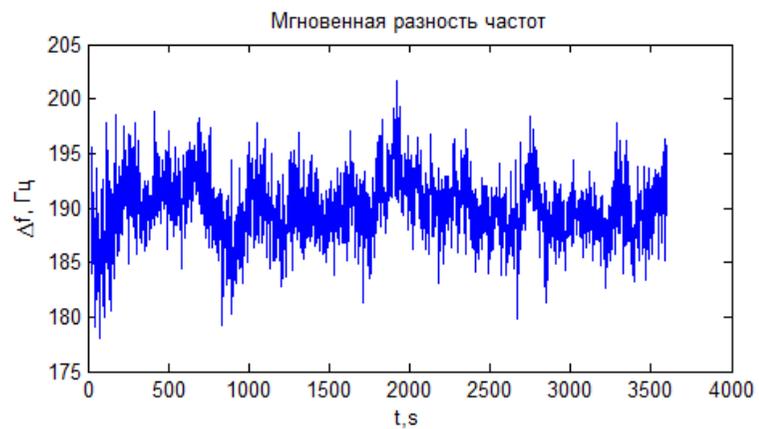
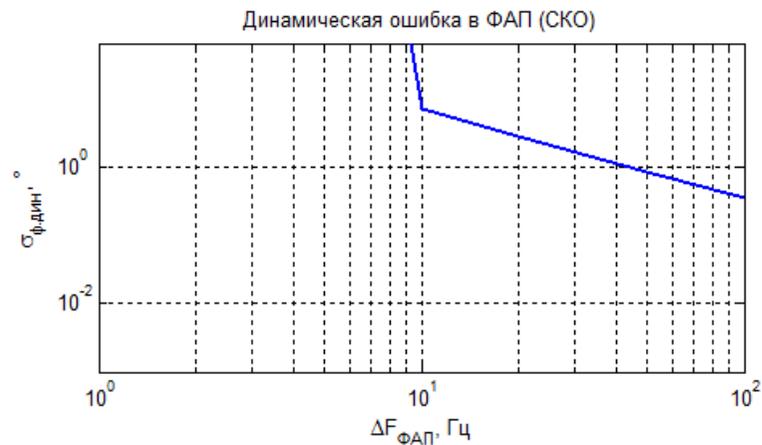
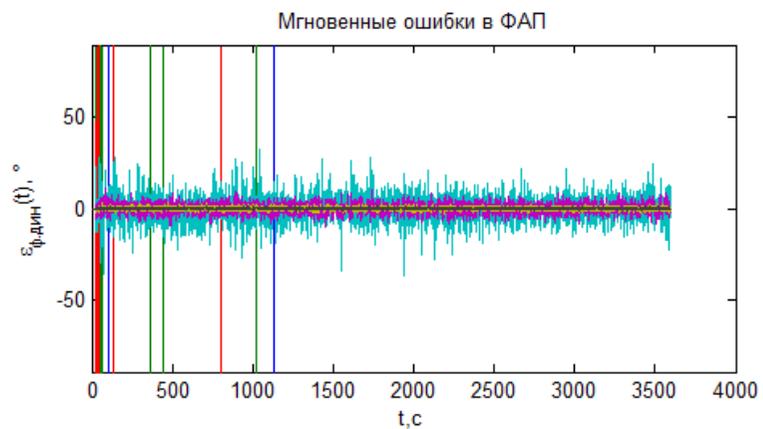
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk99-open-3000s	ТХСО	открытый	ФАП-3



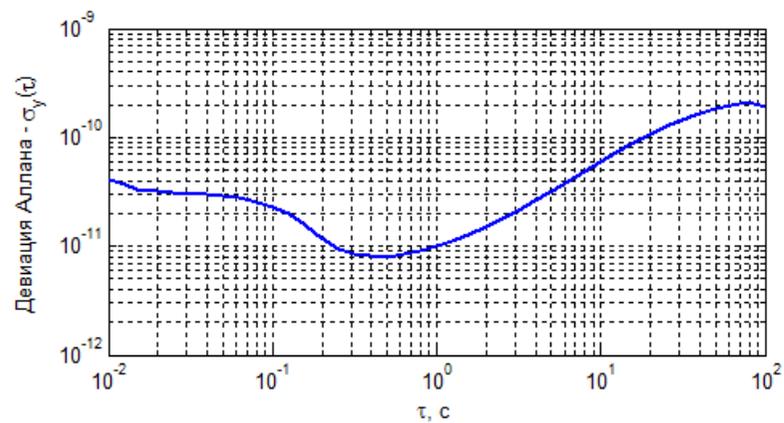
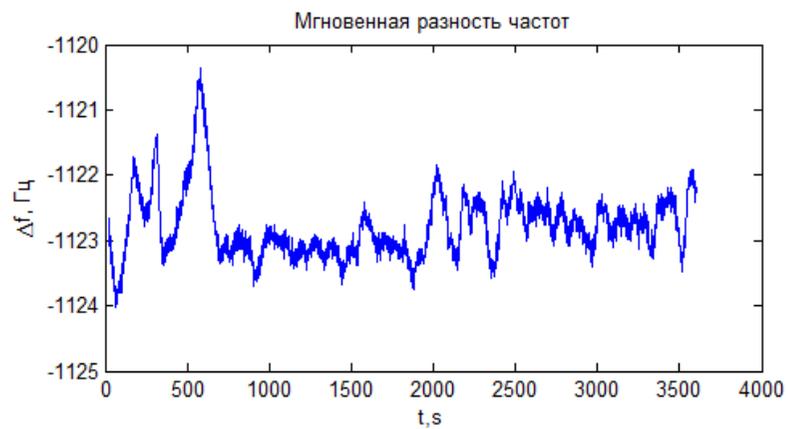
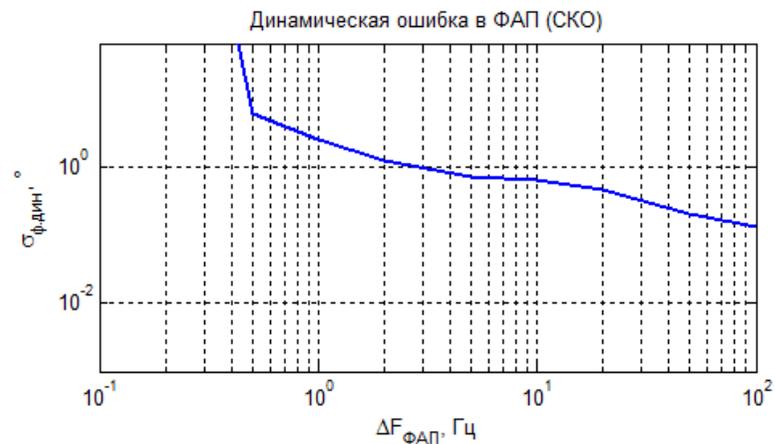
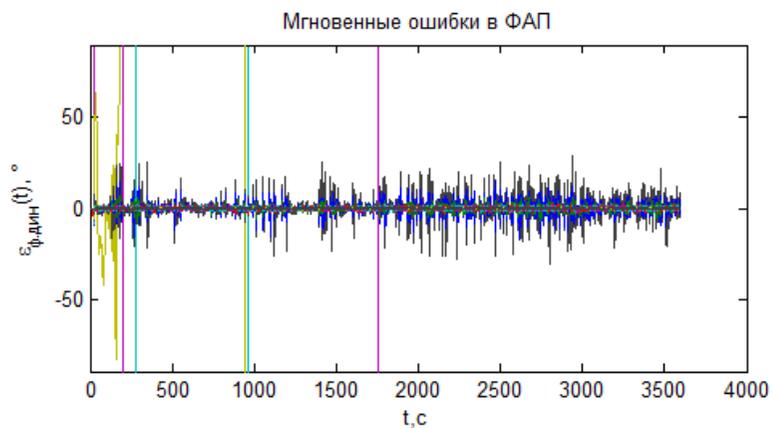
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk206-3600s-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-3



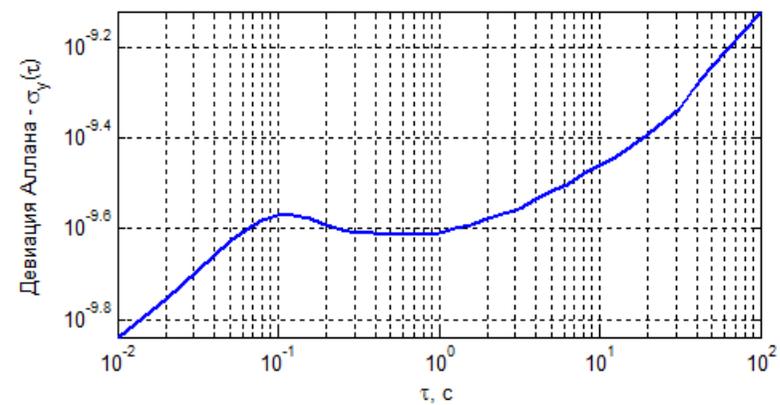
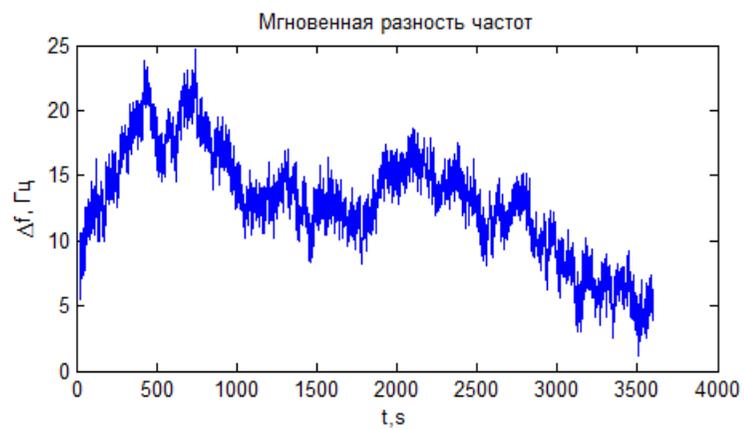
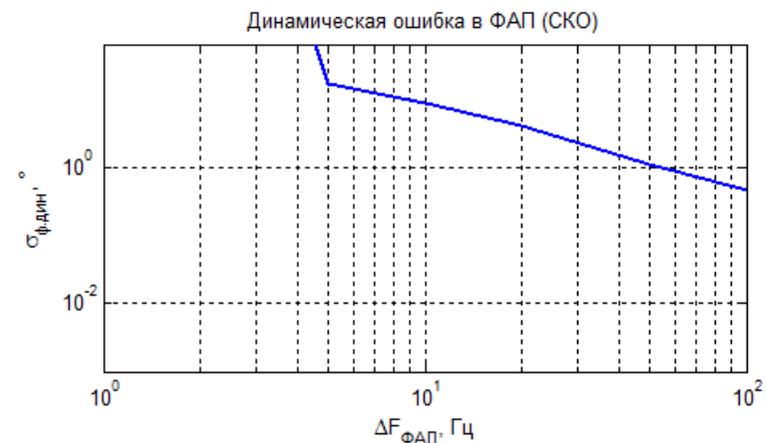
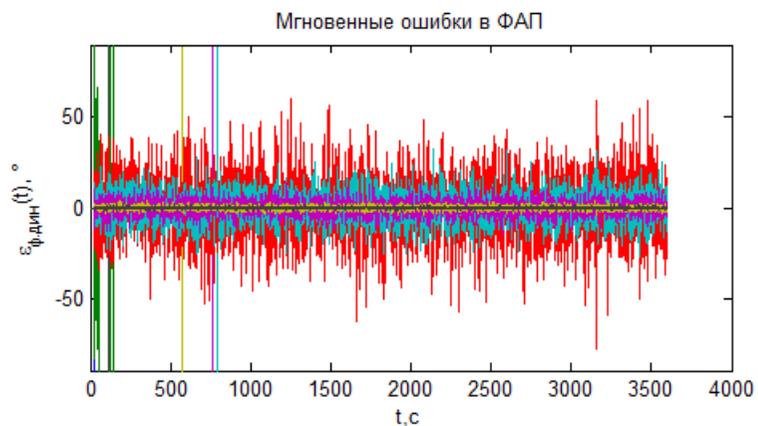
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk206-3600s-open	ТХСО	открытый	ФАП-3



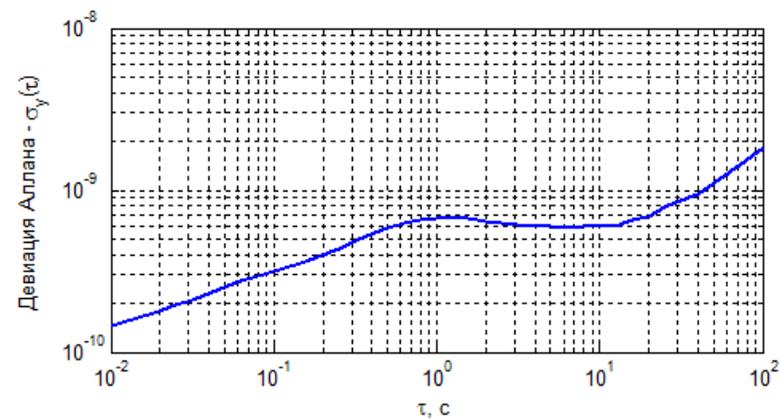
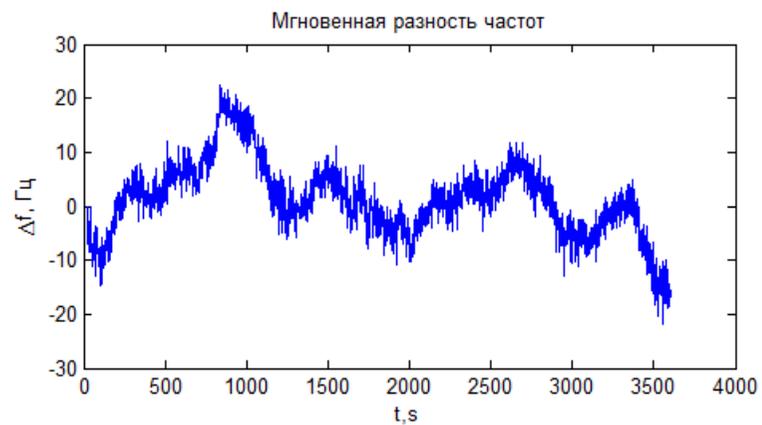
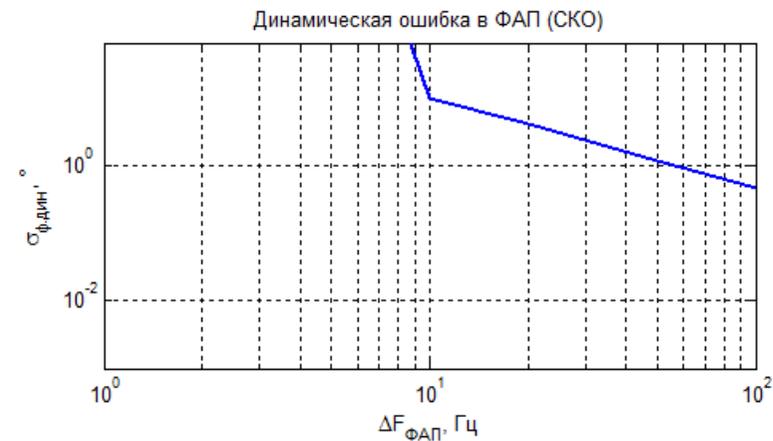
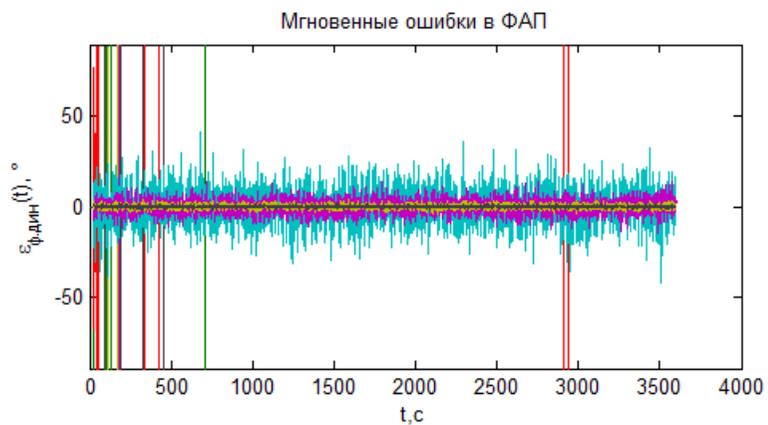
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk267ts-3600s-open	ОХСО	открытый	ФАП-3



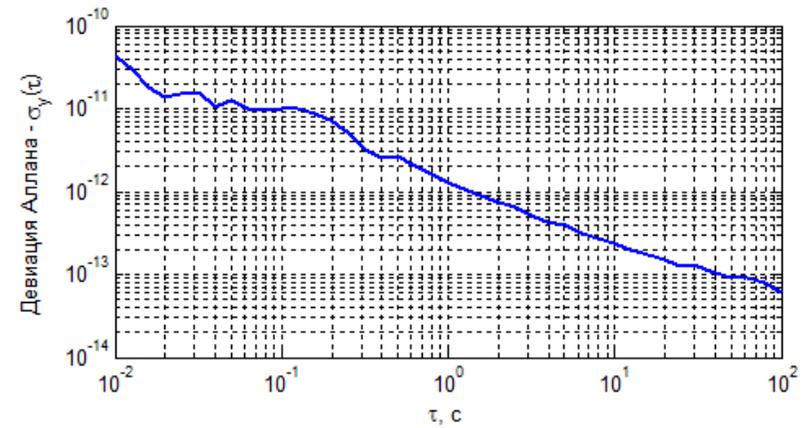
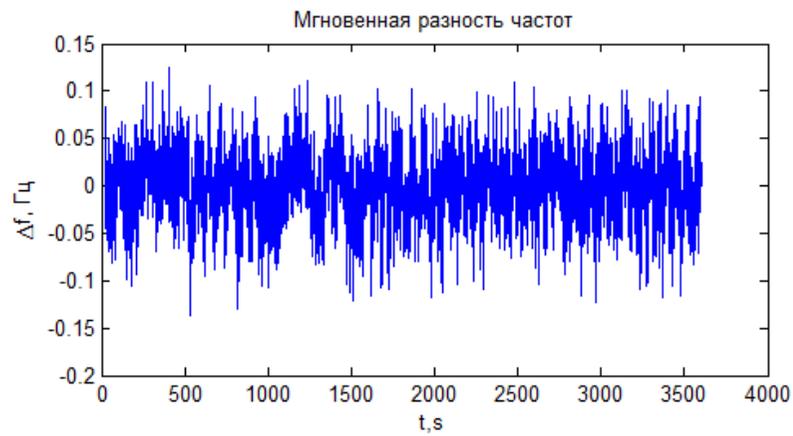
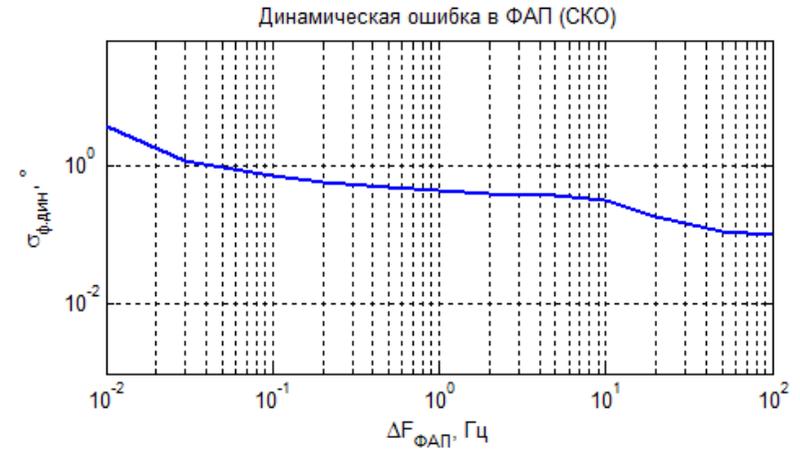
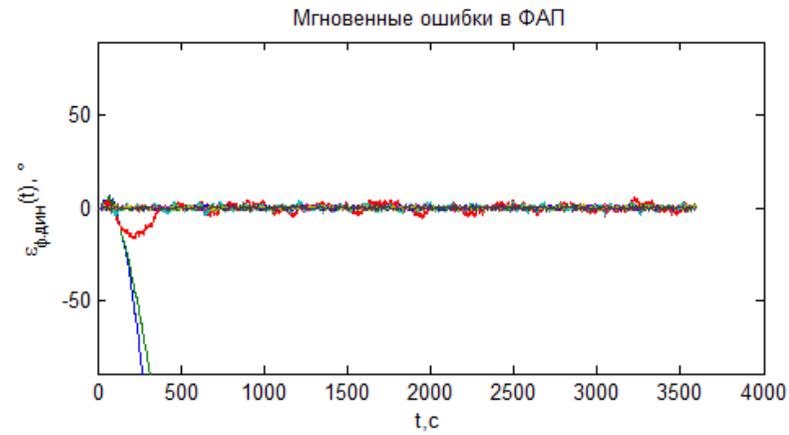
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gtxo83-3600s-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-3



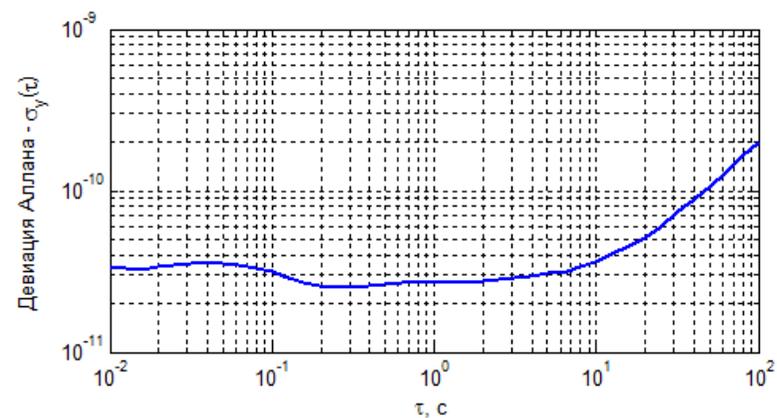
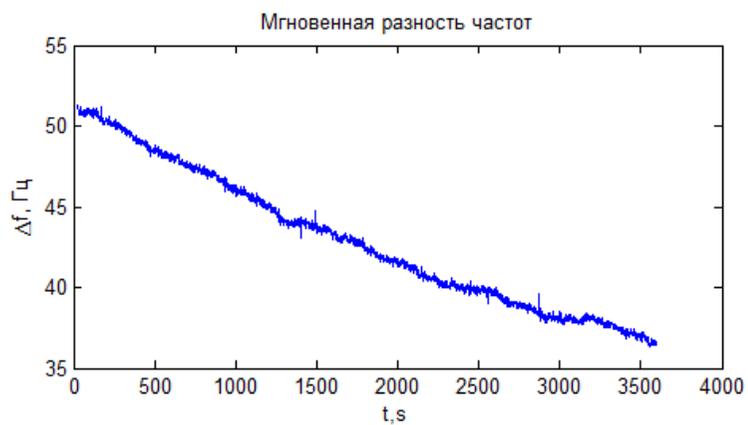
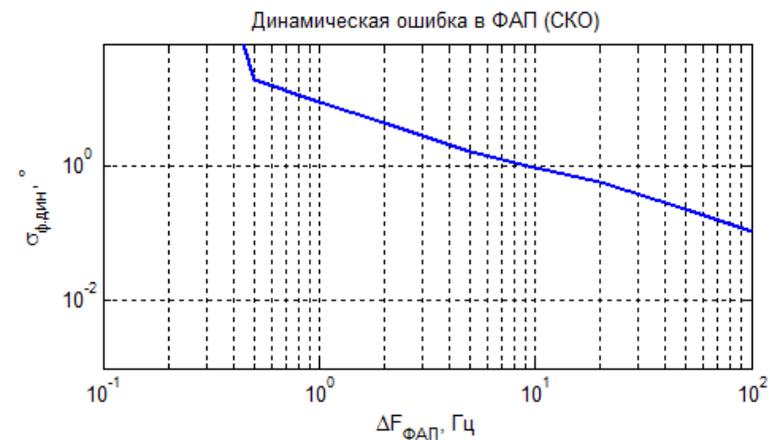
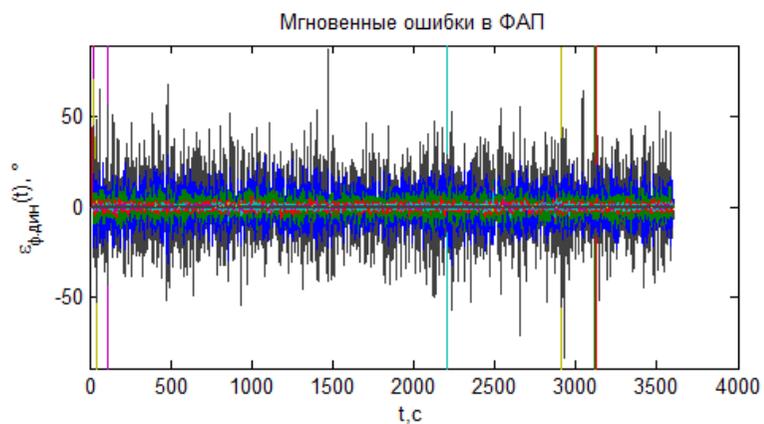
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gtxo83-3600s-open	ТХСО	открытый	ФАП-3



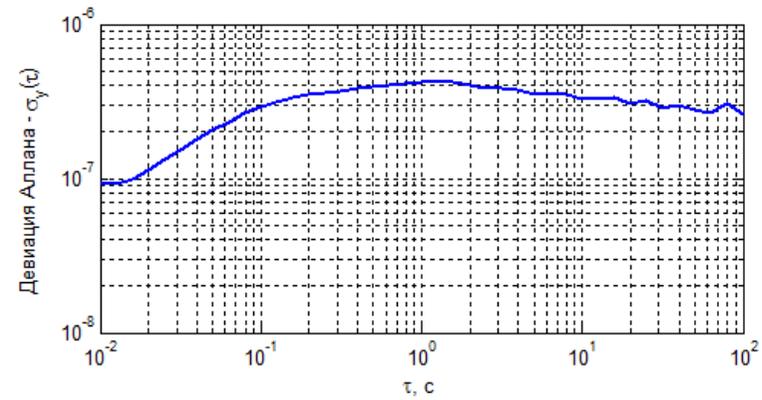
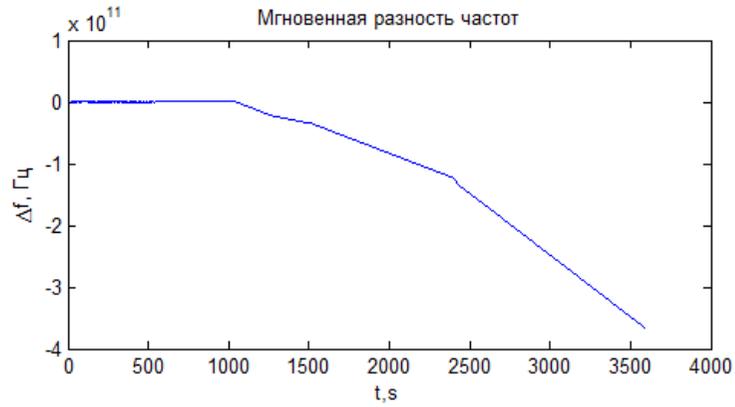
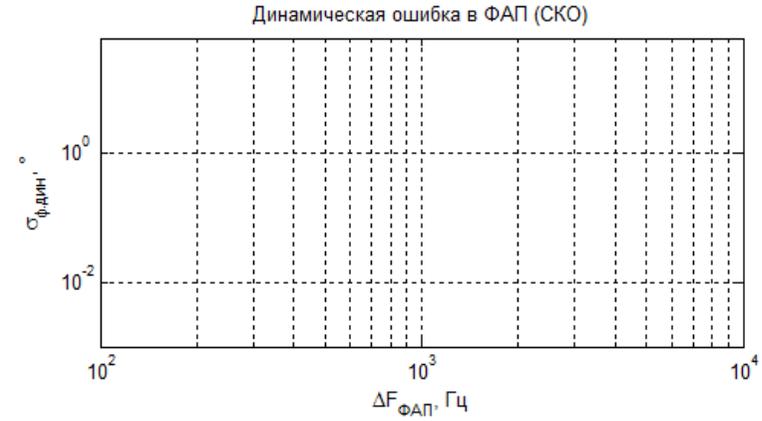
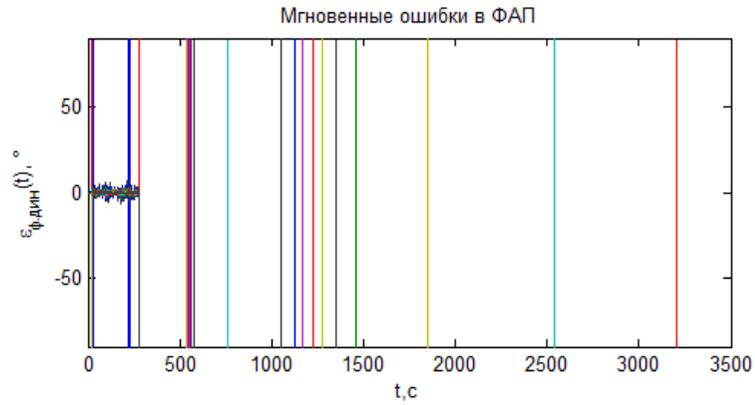
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
h-h3600s-ultimate	водородный стандарт частоты	-	ФАП-3



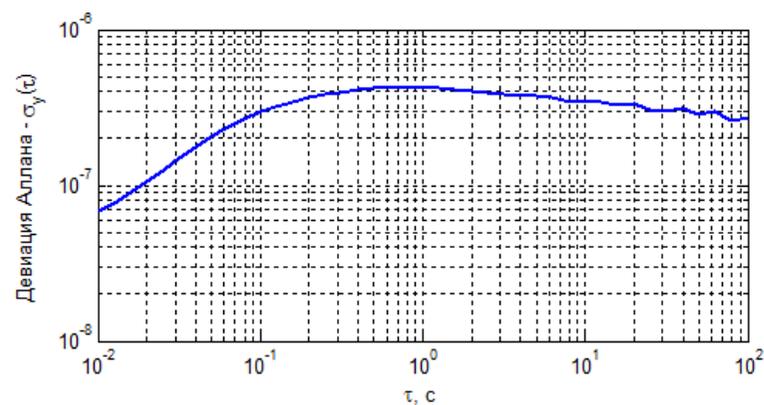
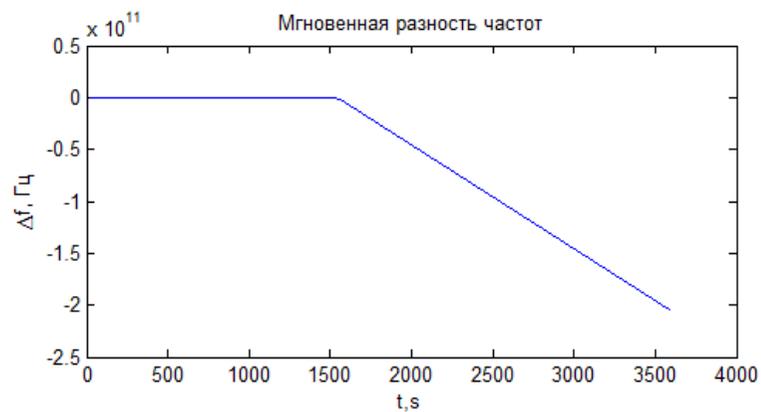
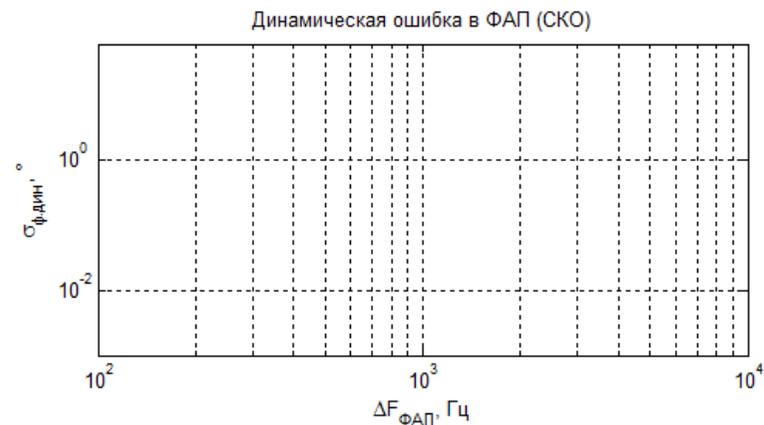
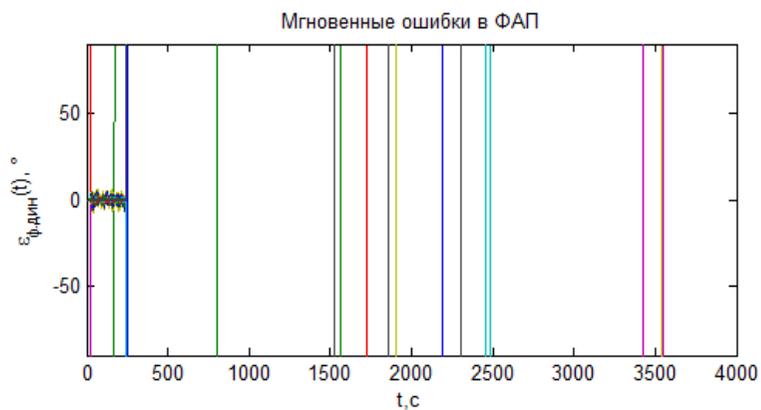
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
приборный R&S	ОСХО	открытый	ФАП-3



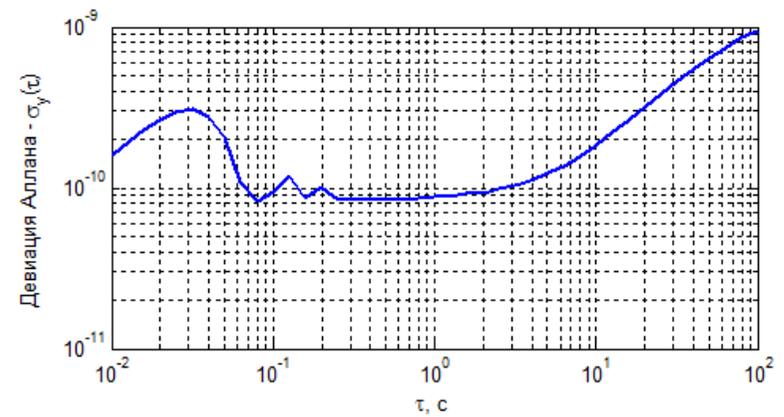
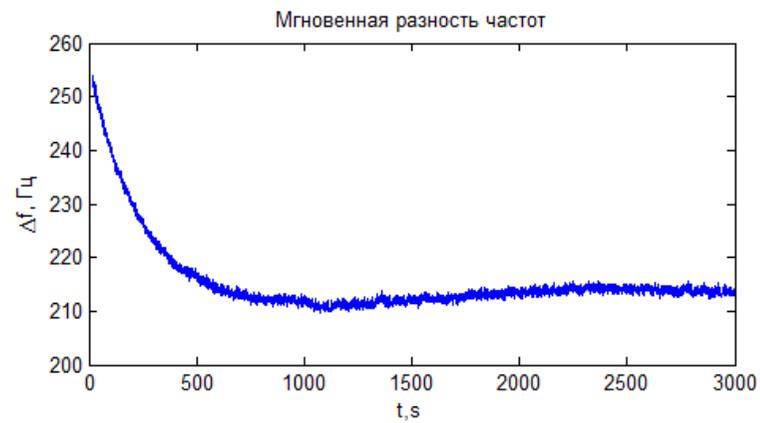
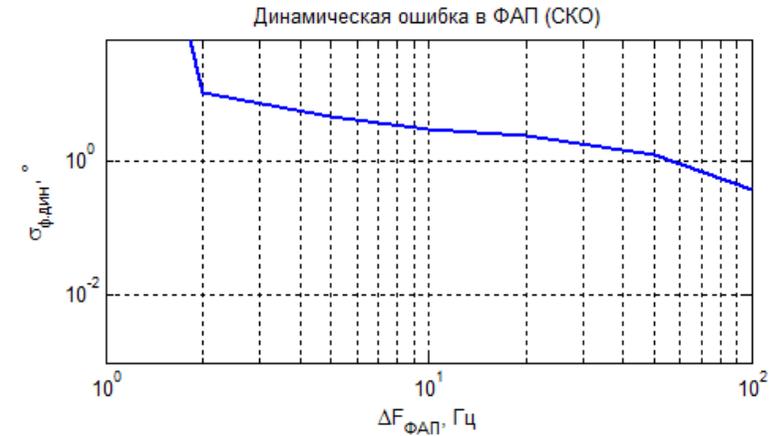
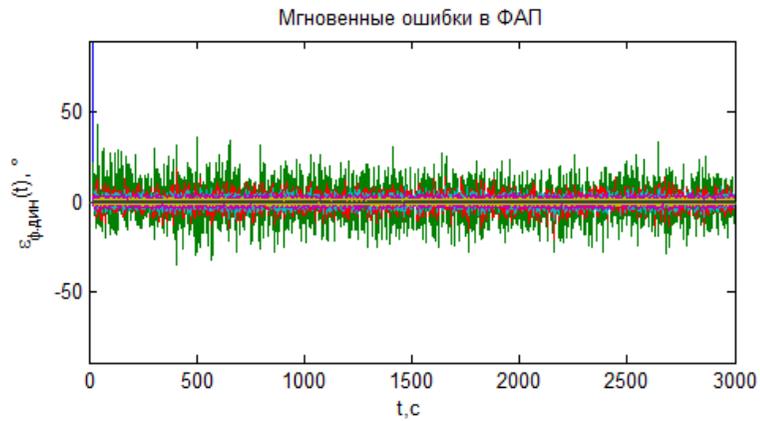
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asflmb-3600s-box	mems	в корпусе	ФАП-3



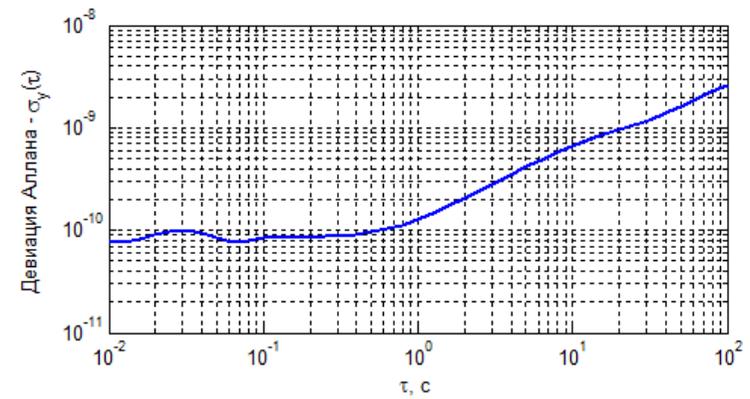
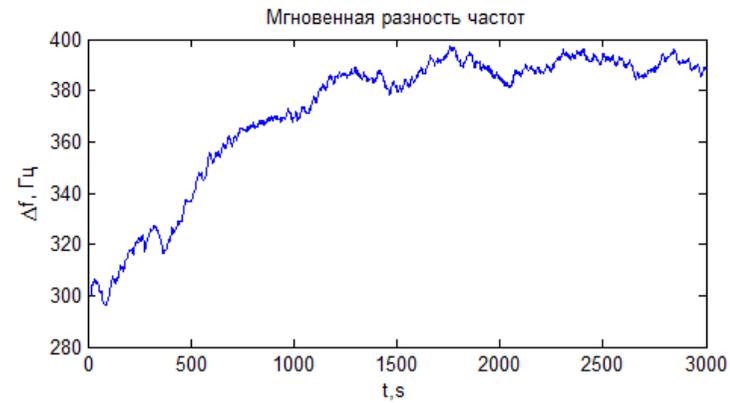
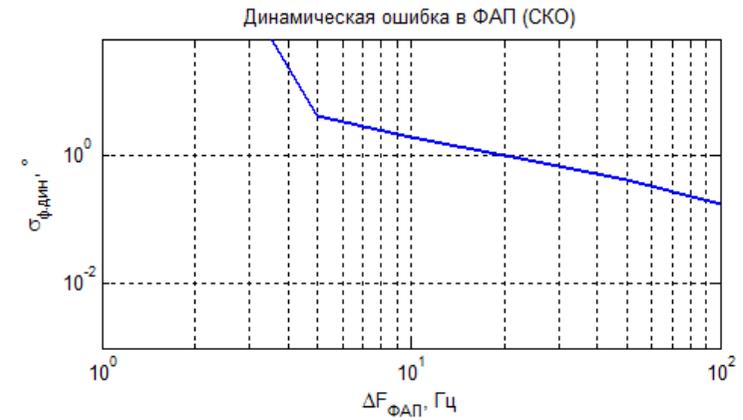
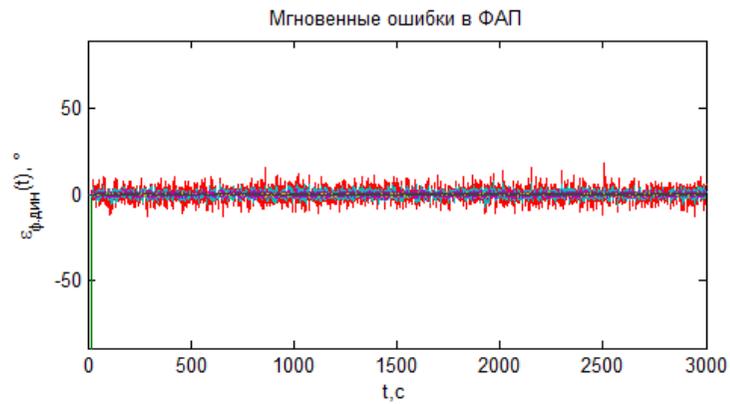
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asflmb-3600s-open	mems	открытый	ФАП-3



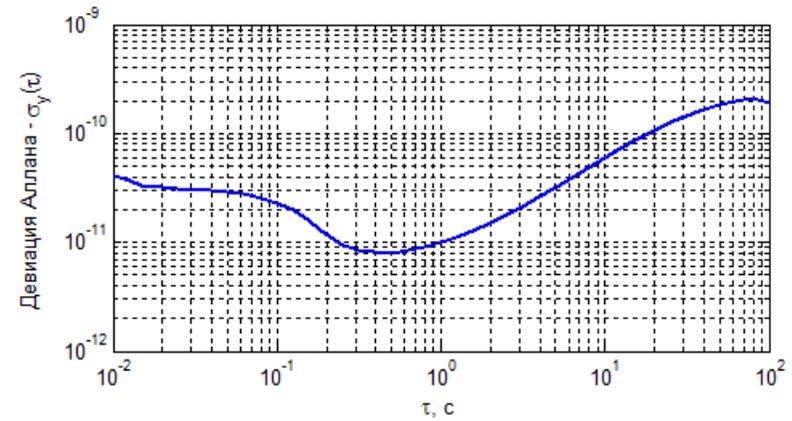
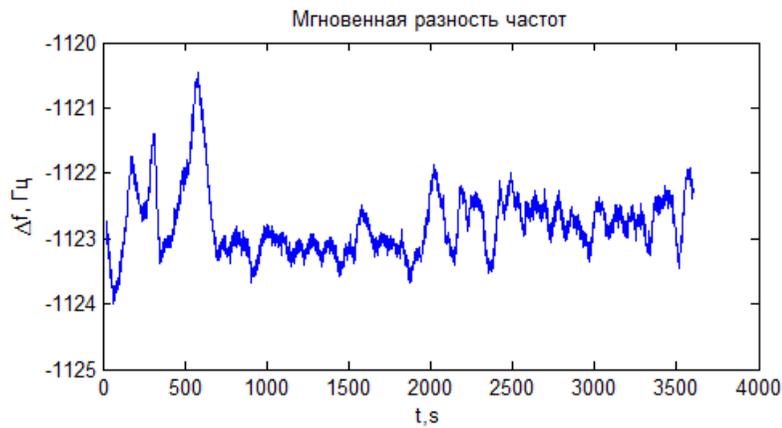
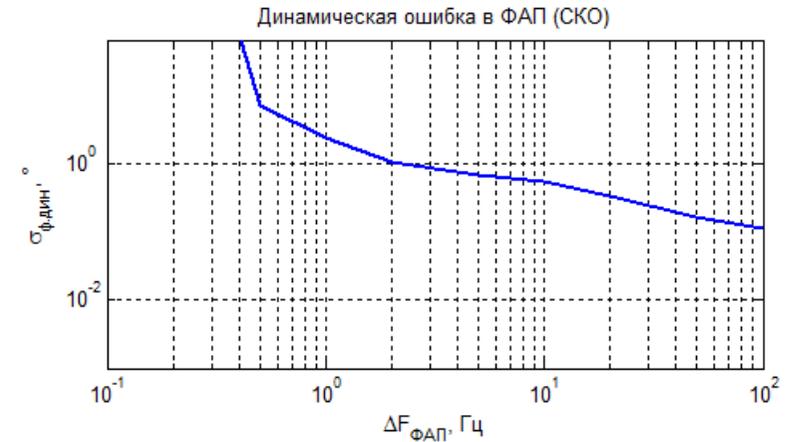
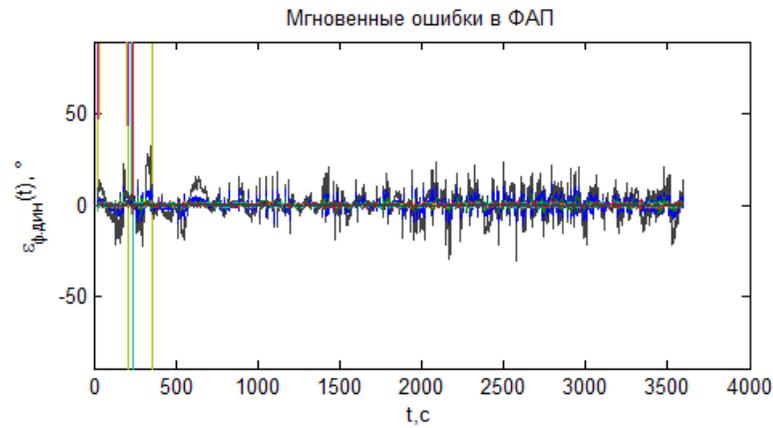
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk99-in-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-2



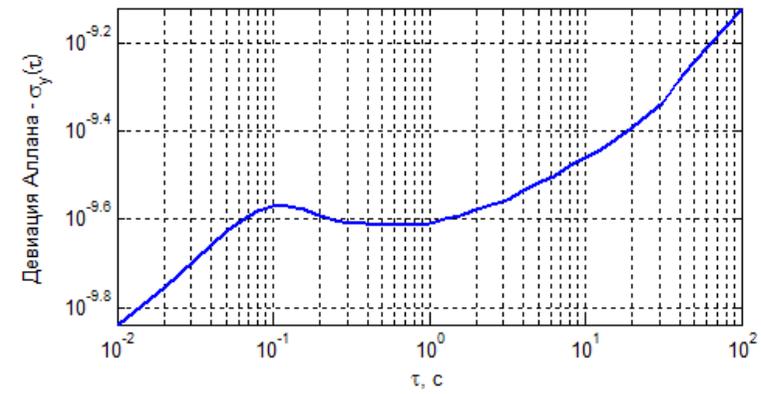
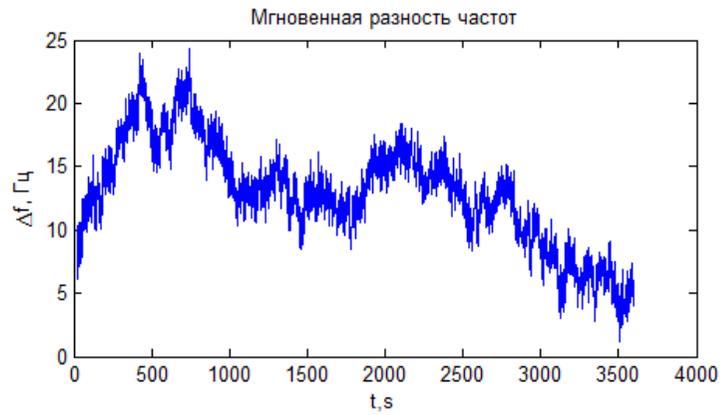
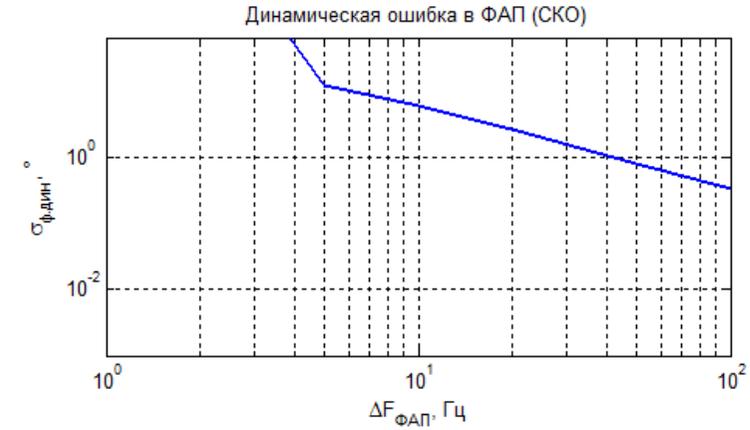
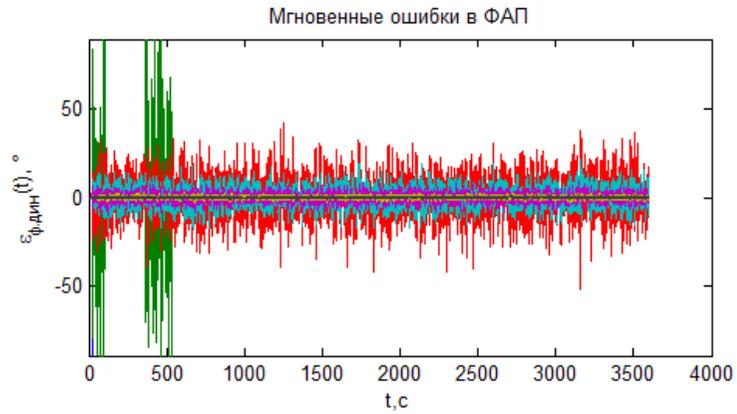
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk99-open	ТХСО	открытый	ФАП-2



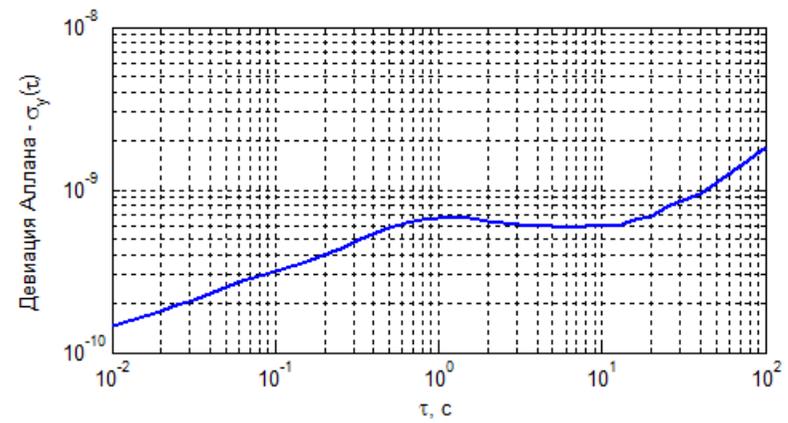
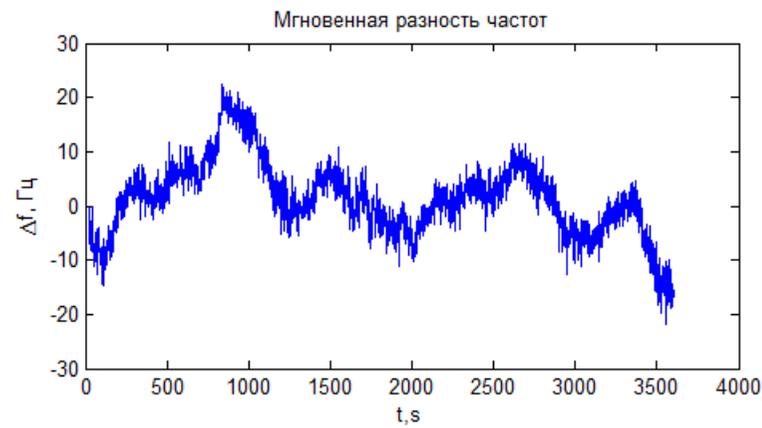
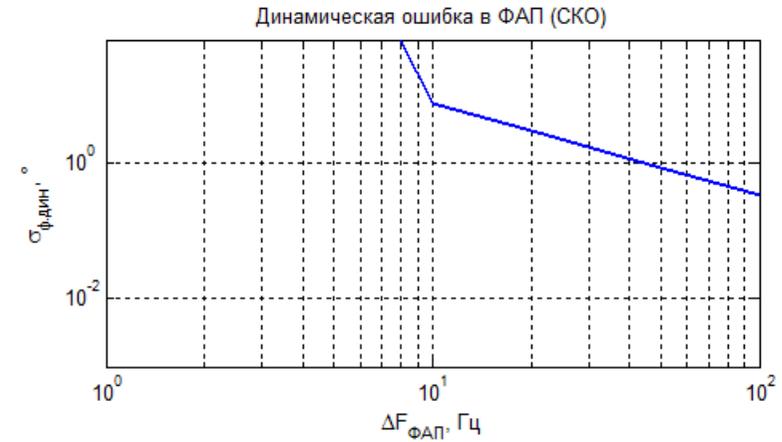
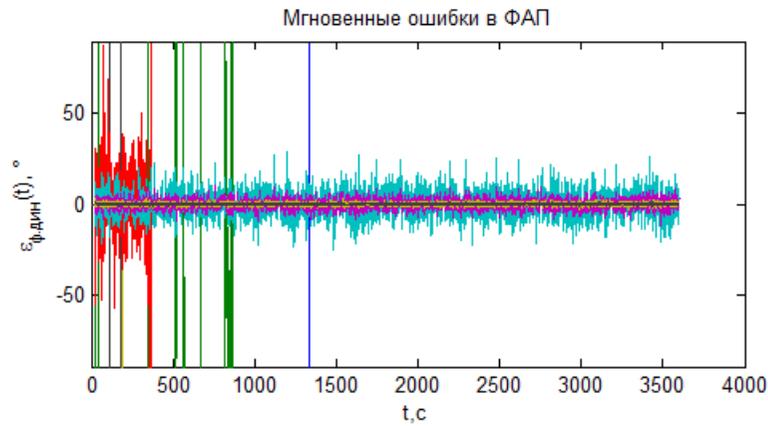
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gk267ts-3600s-open	ОСХО	открытый	ФАП-2



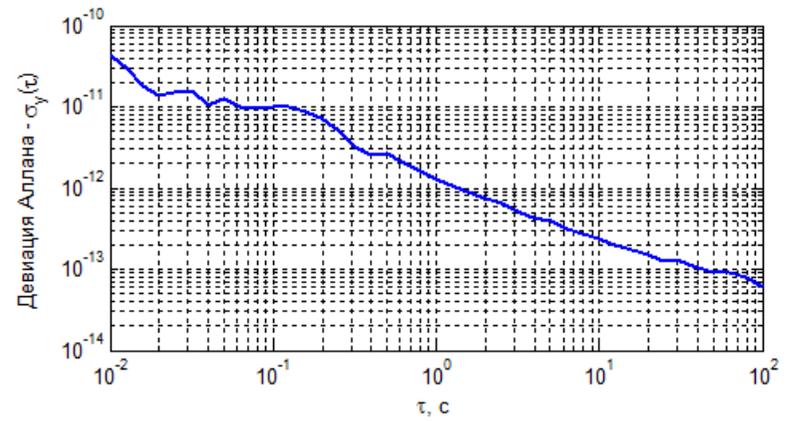
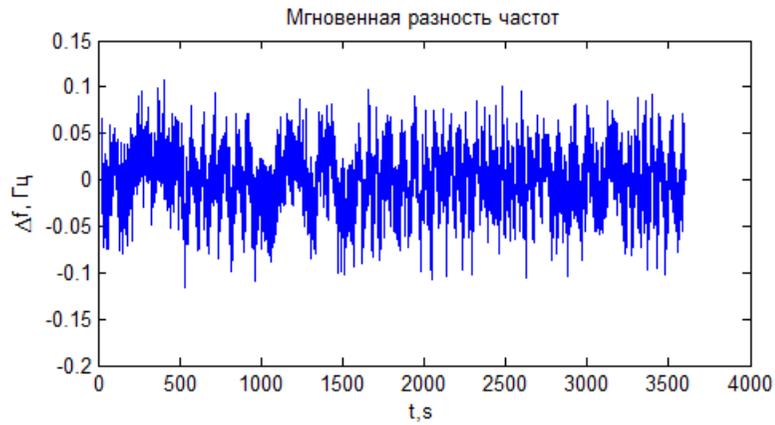
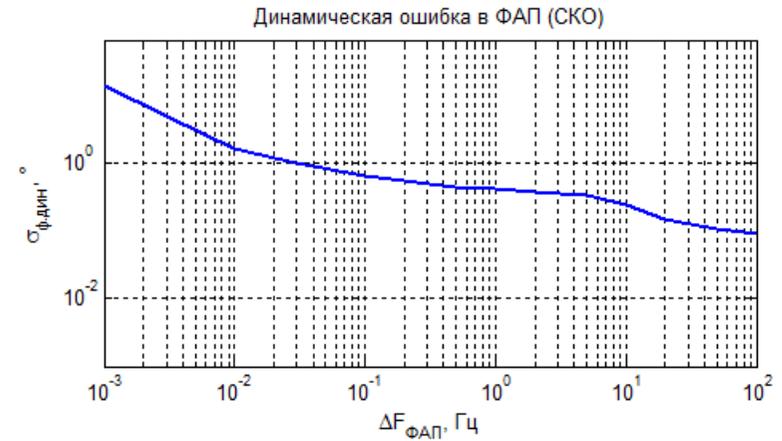
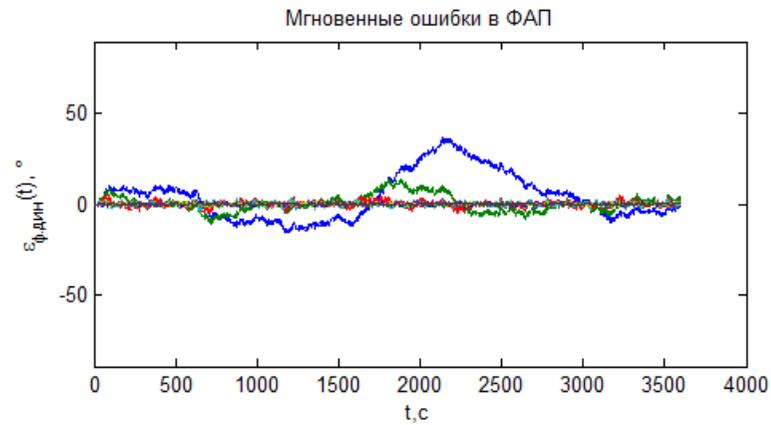
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gtxo83-3600s-box	ТХСО	в корпусе	ФАП-2



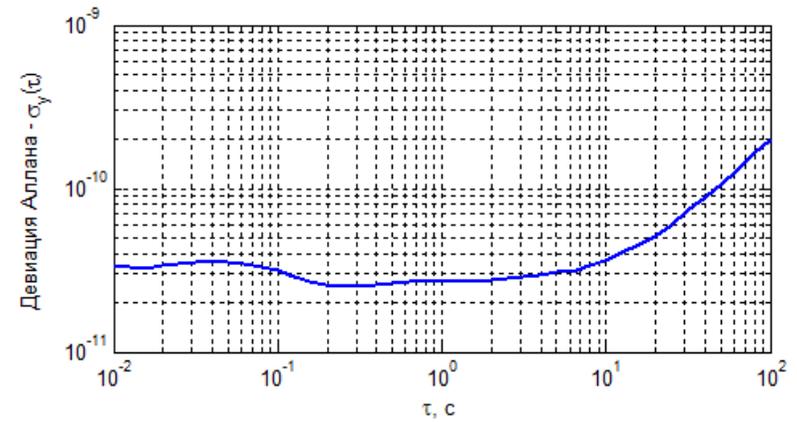
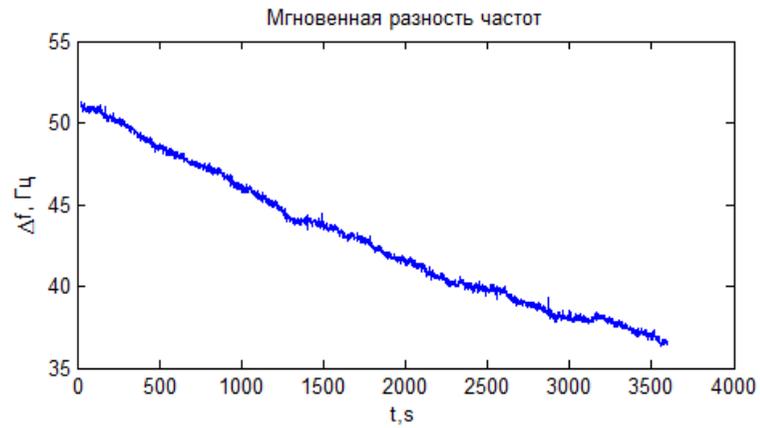
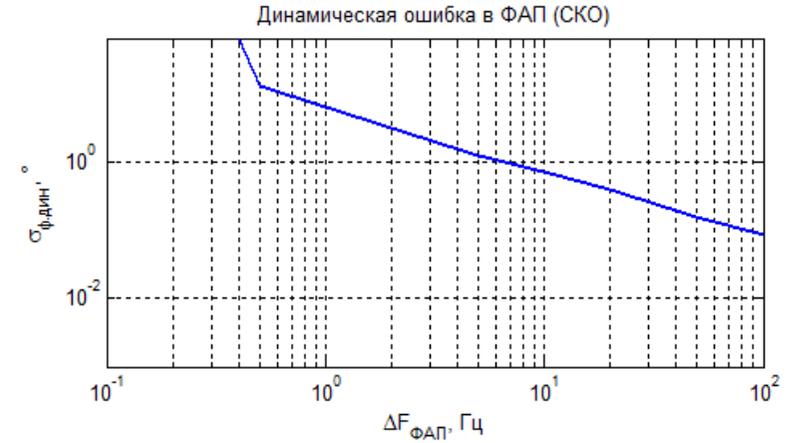
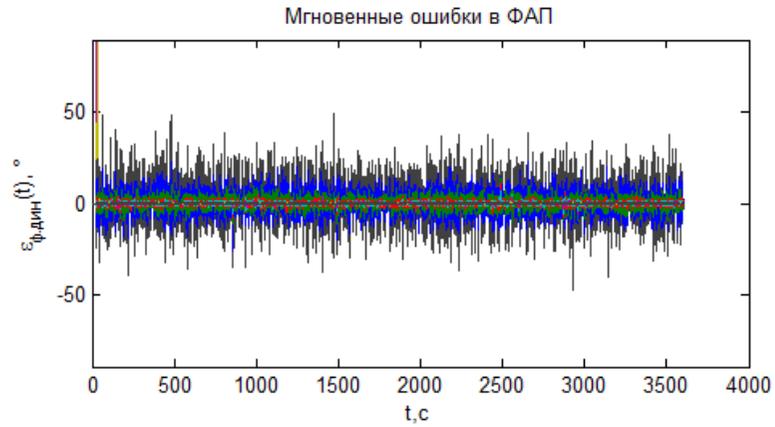
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
gtxo83-3600s-open	ТХСО	открытый	ФАП-2



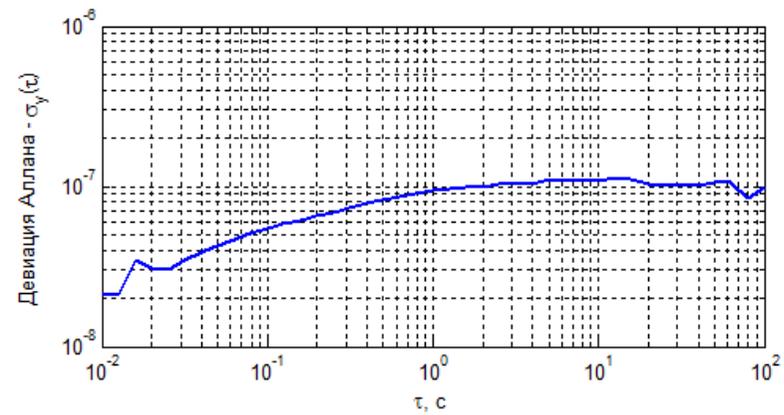
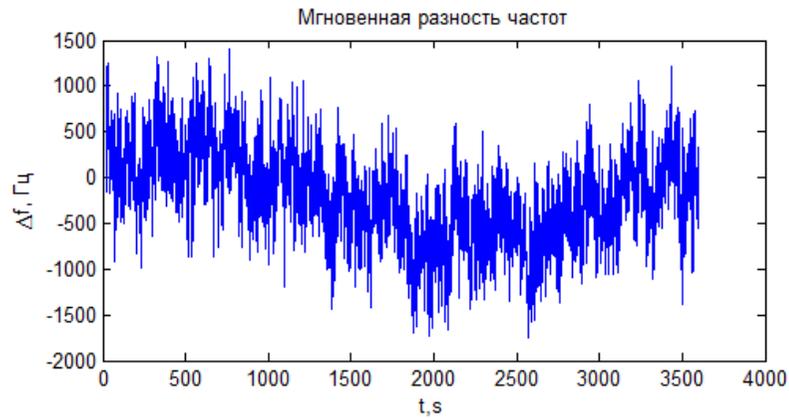
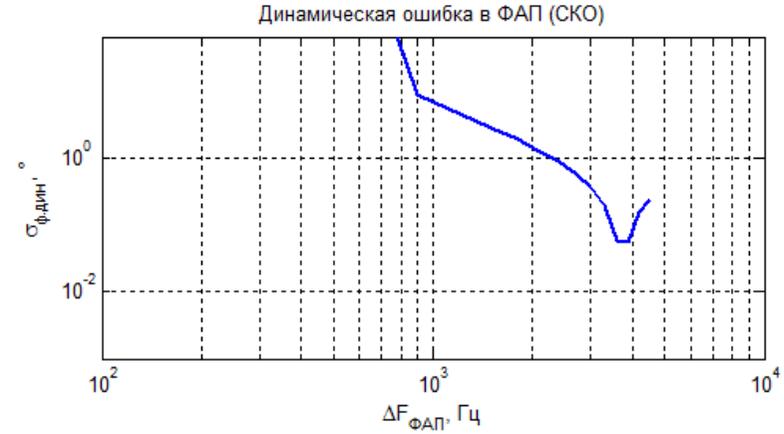
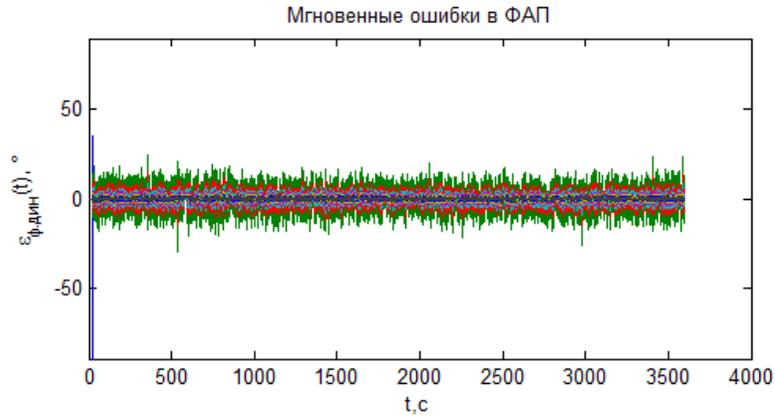
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
h-h3600s-ultimate	водородный стандарт частоты	-	ФАП-2



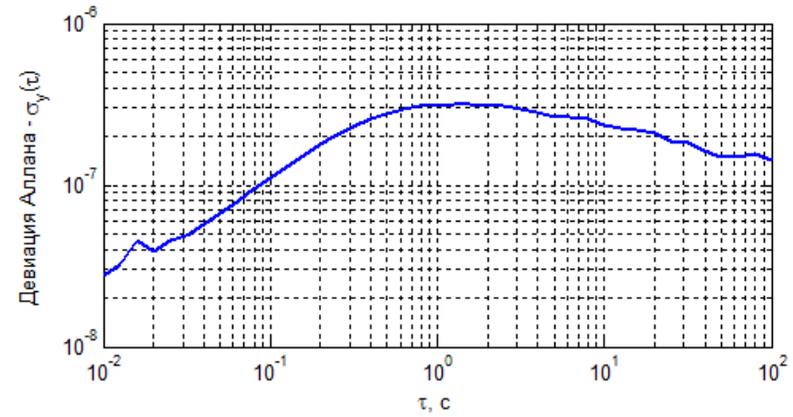
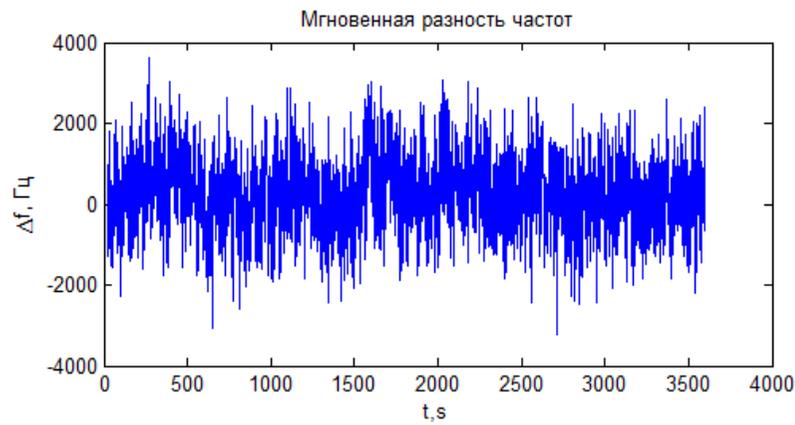
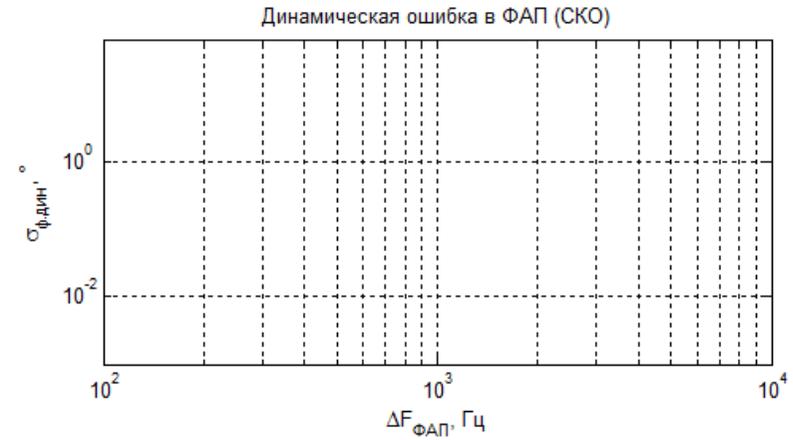
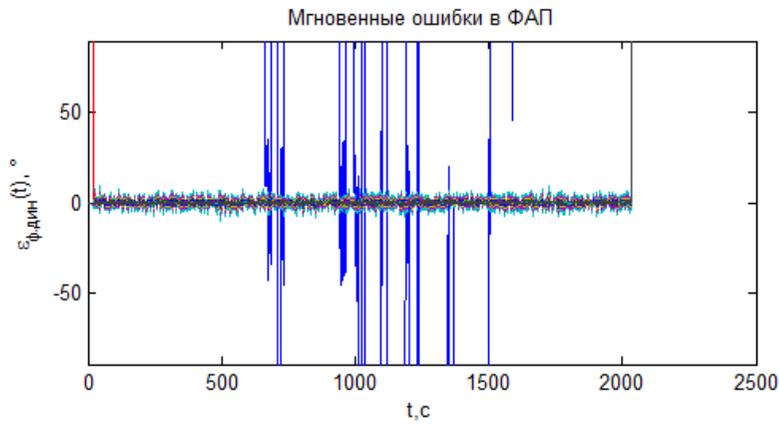
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
приборный R&S	ОСХО	открытый	ФАП-2



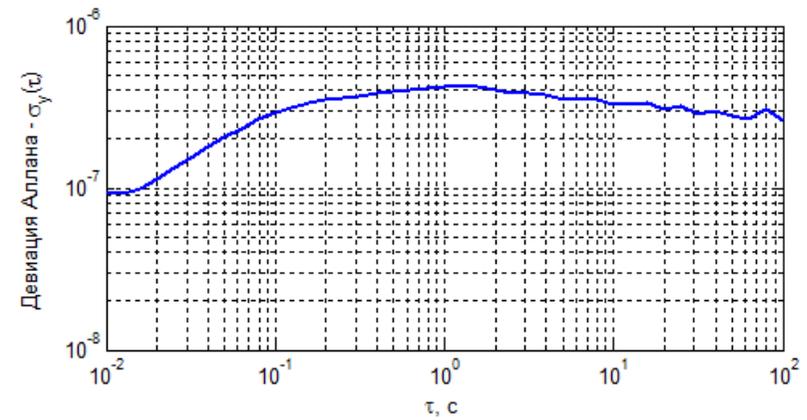
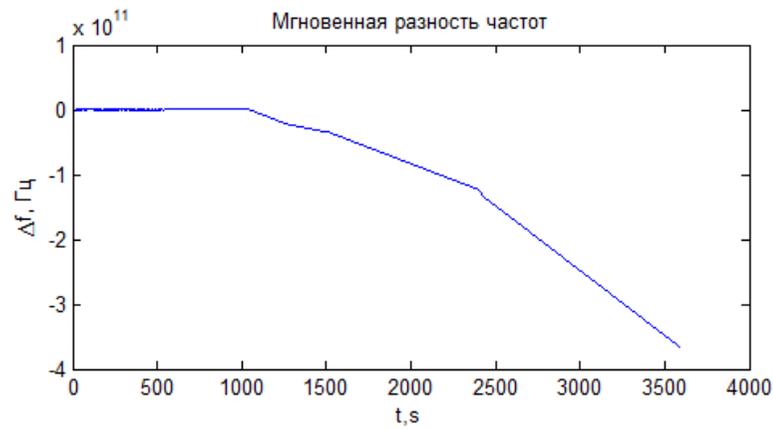
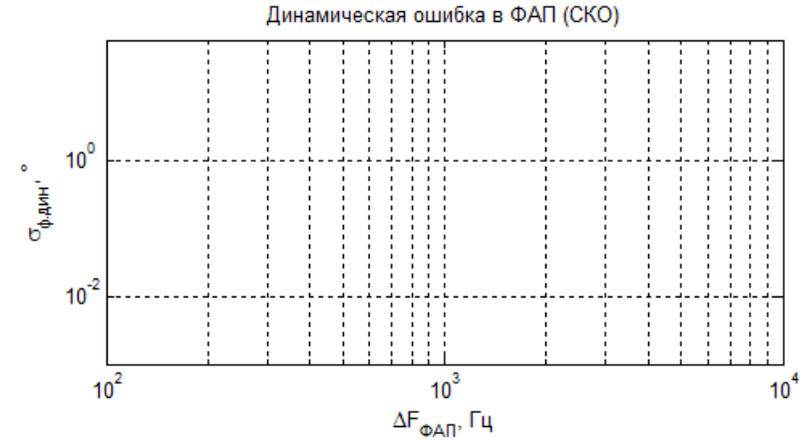
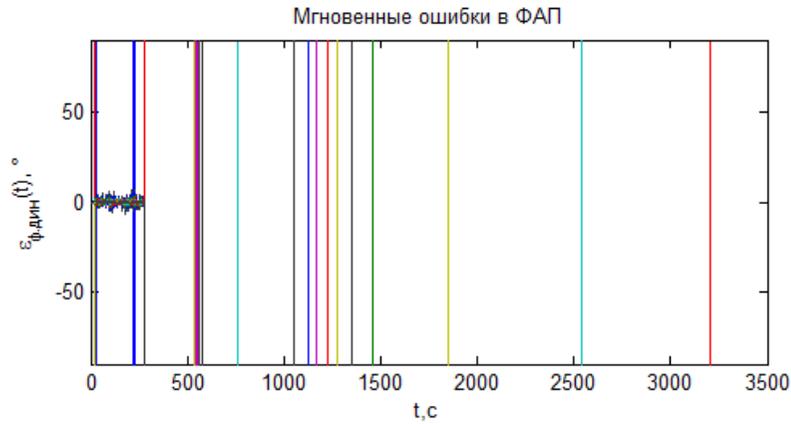
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asemp_3600s-box	mems	в корпусе	ФАП-2



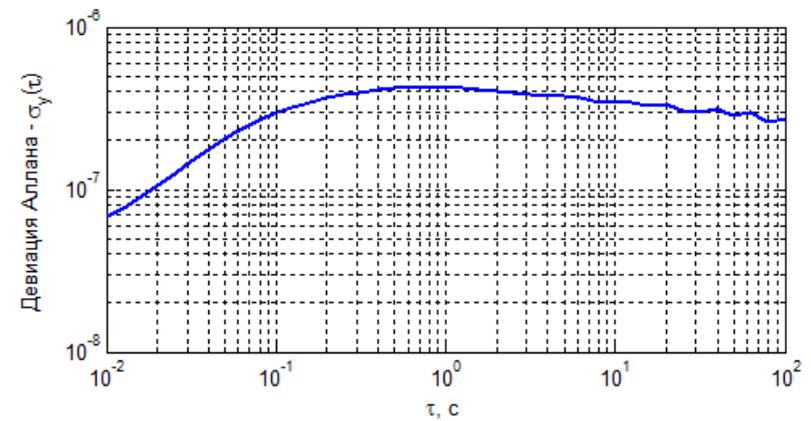
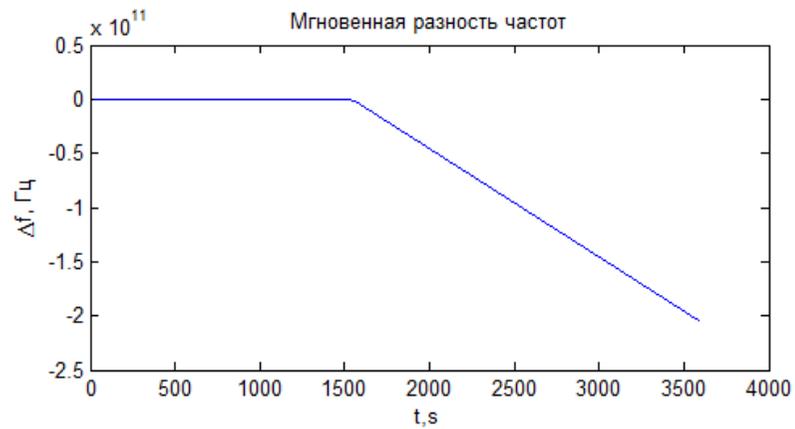
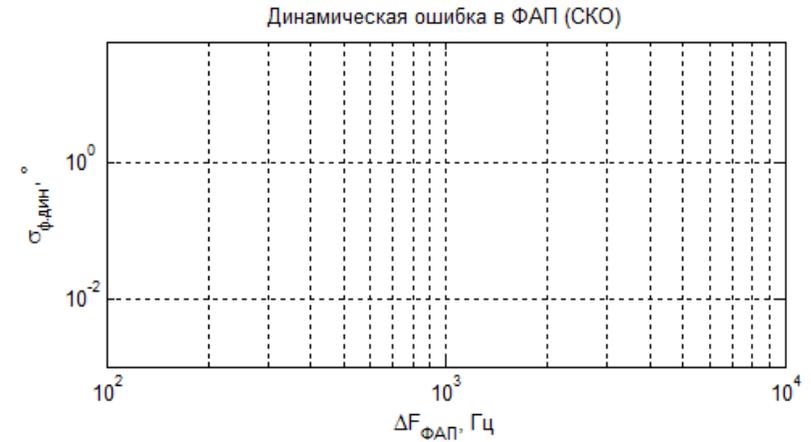
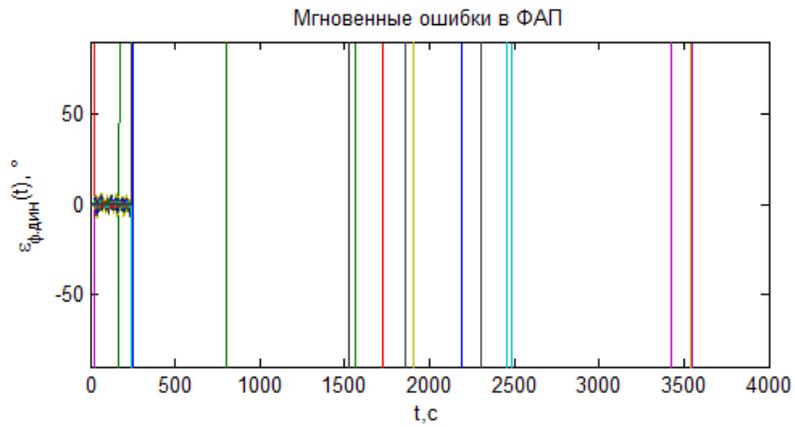
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asemp_2000s-open	mems	открытый	ФАП-2



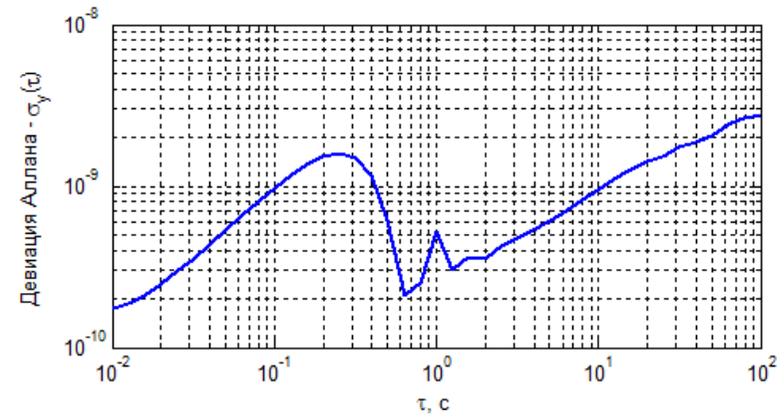
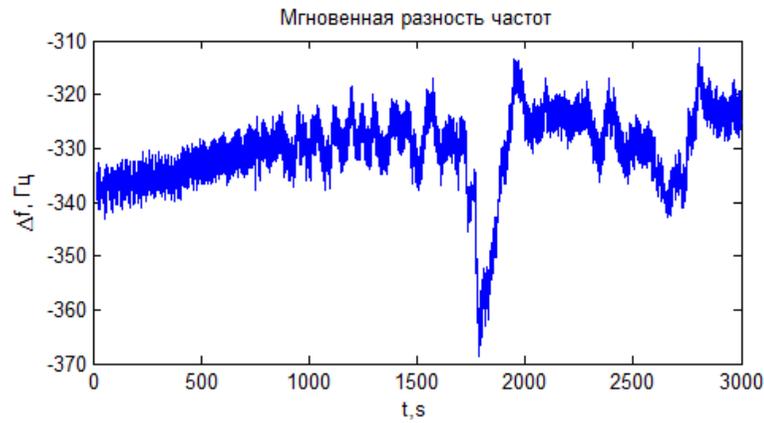
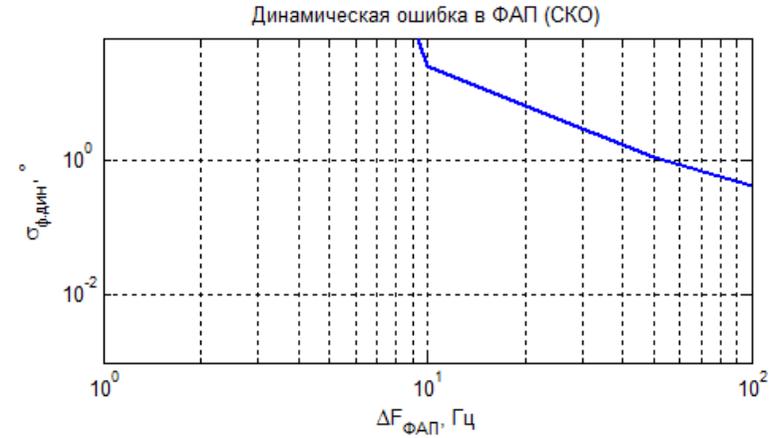
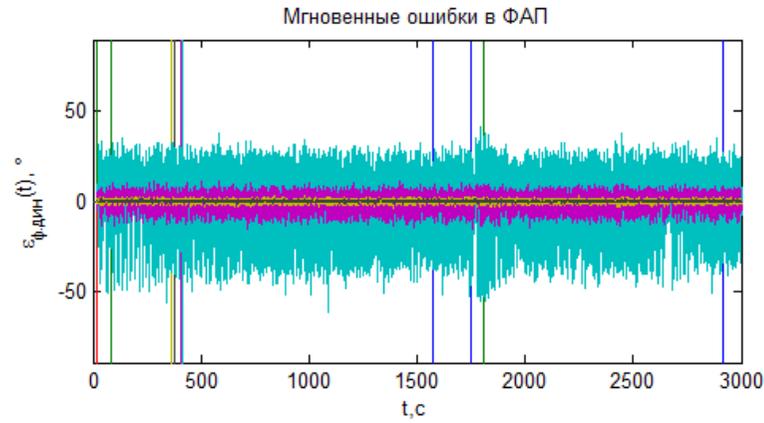
Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asflmb-3600s-box	mems		ФАП-2



Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
asflmb-3600s-open	mems	открытый	ФАП-2



Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
c2206-3600s-box	ТХСО		ФАП-2



Имя файла	Тип ОГ	Условие	Порядок ФАП
c2260-3600-open	ТХСО	открытый	ФАП-2

