

## Исследование кратковременных нестабильностей кварцевых опорных генераторов для применения в НАП

© А. Ю. Шатилов

### Введение

В ряде применений НАП, а именно на стационарных и малоподвижных объектах, в угломерной аппаратуре, а также при тесно связанном комплексировании с инерциальной навигационной системой (ИНС), нестабильность частоты опорного генератора (ОГ) вносит основной вклад в динамическую ошибку слежения за сигналами СРНС, что ограничивает точность и помехоустойчивость. Так, например, полосу ФАП нельзя сужать ниже определенной величины, при которой динамическая ошибка будет приводить к срыву. В спецификациях ОГ приводятся характеристики (например, девиация Аллана), далекие от этой предельной полосы ФАП.

Методика расчета предельной полосы ФАП в зависимости от данных спецификации ОГ в известной автору литературе отсутствует. Поэтому первой целью настоящего исследования является экспериментальное выяснение того, до какого минимального значения нестабильность частоты ОГ позволит сузить полосу ФАП, и как эта предельная полоса ФАП связана с девиацией Аллана заданного ОГ – той характеристикой нестабильности, которая обычно приводится в спецификации.

В некогерентных дискриминаторах частоты и задержки вида

$$u_{d,\omega,k} = Q_k I_{k-1} - I_k Q_{k-1}, \quad u_{d,\tau,k} = (I_{E,k}^2 + Q_{E,k}^2) - (I_{L,k}^2 + Q_{L,k}^2) \quad (1)$$

время накопления корреляционных компонент  $I$ ,  $Q$ ,  $I_E$ ,  $Q_E$ ,  $I_L$ ,  $Q_L$  обуславливает их флуктуационную характеристику, то есть дисперсию шумовой составляющей, приведенной к единицам частоты или задержки. Для достижения высокой чувствительности (или точности) некогерентного режима необходимо эту дисперсию уменьшать, что можно сделать за счет увеличения времени накопления корреляционных компонент. При отсутствии (или снятии) динамики потребителя очевидно, что время накопления

$I, Q$  будет ограничено нестабильностью фазы ОГ. Так, например, с увеличением времени накопления  $T_{acc}$  отношение с/ш на выходе коррелятора будет сначала расти, а затем падать из-за ухода фазы опорного сигнала в соответствии с выражением [1]:

$$q_I(T_{acc}) = \frac{A^2}{2N_0 T_{acc}} \left| \int_{t_0}^{t_0+T_{acc}} \exp(j \cdot \delta\varphi(t-t_0)) dt \right|^2, \quad (2)$$

где  $\delta\varphi(t-t_0)$  – процесс дрейфа фазы ОГ,  $A$  – амплитуда полезного сигнала на входе приемника,  $N_0$  – спектральная плотность внутреннего шума, приведенная ко входу приемника,  $t_0$  – момент начала накопления в корреляторе.

Рис. 1. Графики зависимости отношения с/ш на выходе коррелятора от времени накопления для трех выборок дрейфа фазы ОГ

Наличие расходящегося случайного процесса  $\delta\varphi(t-t_0)$  в (2) приводит к тому, что подинтегральное выражение становится знакопеременным в действительной и мнимой частях. Рост интеграла прекращается, а следовательно  $q_I(T_{acc})$  начнет падать при достижении времени накопления некоего критического момента, т. е., дальнейшее накопление уже не приведет к увеличению отношения с/ш, оно бессмысленно и даже вредно. На рис. 1 представлены зависимости отношения с/ш от времени накопления для трех реализаций процесса дрейфа фазы  $\delta\varphi(t-t_0)$ , записанных с опорного генератора ГК-206 с учетом переноса на несущую частоту 1602 МГц.



В известной литературе опять-таки отсутствуют методики или оценки, связывающие предельное время накопления, с параметрами из спецификации ОГ (например, с девиацией Аллана). Все инженеры, занимающиеся разработкой НАП, «знают», что больше 100 мс копить нельзя, но попытки выяснить источник такого «знания» ни к чему не приводят. Поэтому в *второй* целию данного исследования является *экспериментальное определение предельного времени накопления  $T_{acc}$*  (при котором отношение с/ш на выходе коррелятора максимально) и нахождение его связи с девиацией Аллана.

При синтезе следящих систем часто [1] используется линейная динамическая модель дрейфа фазы ОГ, которую в общем виде можно записать как

$$\frac{d\delta\varphi}{dt} = \delta\omega(t) + n_\varphi(t), \quad \frac{d\delta\omega}{dt} = n_\omega(t), \quad (2)$$

где  $n_\varphi(t)$ ,  $n_\omega(t)$  – белые гауссовские шумы (БГШ) со спектральными плотностями  $S_\varphi$  и  $S_{OG}$  соответственно. В некоторых вариациях этой модели полагают  $n_\varphi(t)=0$ , а в некоторых –  $n_\omega(t)=0$ . При этом остается вопрос – как поступать правильнее? И как связать спектральные плотности  $S_\varphi$  и  $S_{OG}$  со специфицируемыми параметрами ОГ (девиация Аллана, СПМ фазового шума)? Четкие ответы на эти вопросы отсутствуют; в литературе предложены лишь некоторые подходы и приближения, которые чем более универсальны тем более грубы. В связи с этим, *третьей* целью исследования является *уточнение модели ОГ* вида (2) и *нахождение параметров этой модели* для конкретного испытуемого опорного генератора.

### Методика эксперимента

Методика эксперимента основана на взаимном гетеродинировании сигналов от двух ОГ одной серии номиналом 10 МГц, как показано на рис. 2.

Сигнал одного из ОГ переносится на несущую частоту ГЛОНАСС L1 1602 МГц, сигнал другого – на 1698 МГц. Результирующие сигналы подаются на входы аналогового смесителя, на выходе которого формируется разностное колебание на промежуточной частоте 96 МГц. Это колебание

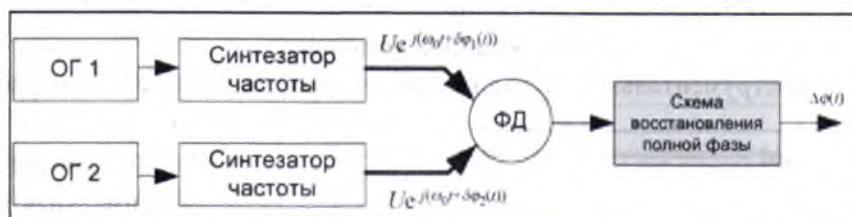


Рис. 2. Принцип получения процесса дрейфа фазы ОГ

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. 3.

Записанные цифровые квадратуры являются комплексным процессом вида

$$\dot{x}(t_k) = U \exp\{j(\delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k))\}, \quad (3)$$

где  $\delta\varphi_1(t_k)$ ,  $\delta\varphi_2(t_k)$  – соответствующие отклонения фазы ОГ1 и ОГ2 относительно номинального линейного роста фазы на несущей частоте 1602 МГц.

Из  $\dot{x}(t_k)$  легко выделить процесс

$$\delta\varphi(t_k) = \frac{\delta\varphi_1(t_k) - \delta\varphi_2(t_k)}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

который приближенно будем считать процессом кратковременной нестабильности фазы для ОГ данной серии с учетом переноса колебания ОГ на несущую 1602 МГц. Производная  $\frac{d\delta\varphi(t)}{dt} = \delta\omega(t)$  является

процессом мгновенной нестабильности частоты ОГ. Типичный вид процесса  $\delta\omega(t)$ , (оцененный для ОГ ГК-99 с помощью системы фазовой автоподстройки (ФАП) 3-го порядка с полосой 100 Гц) приведен на рис. 4.



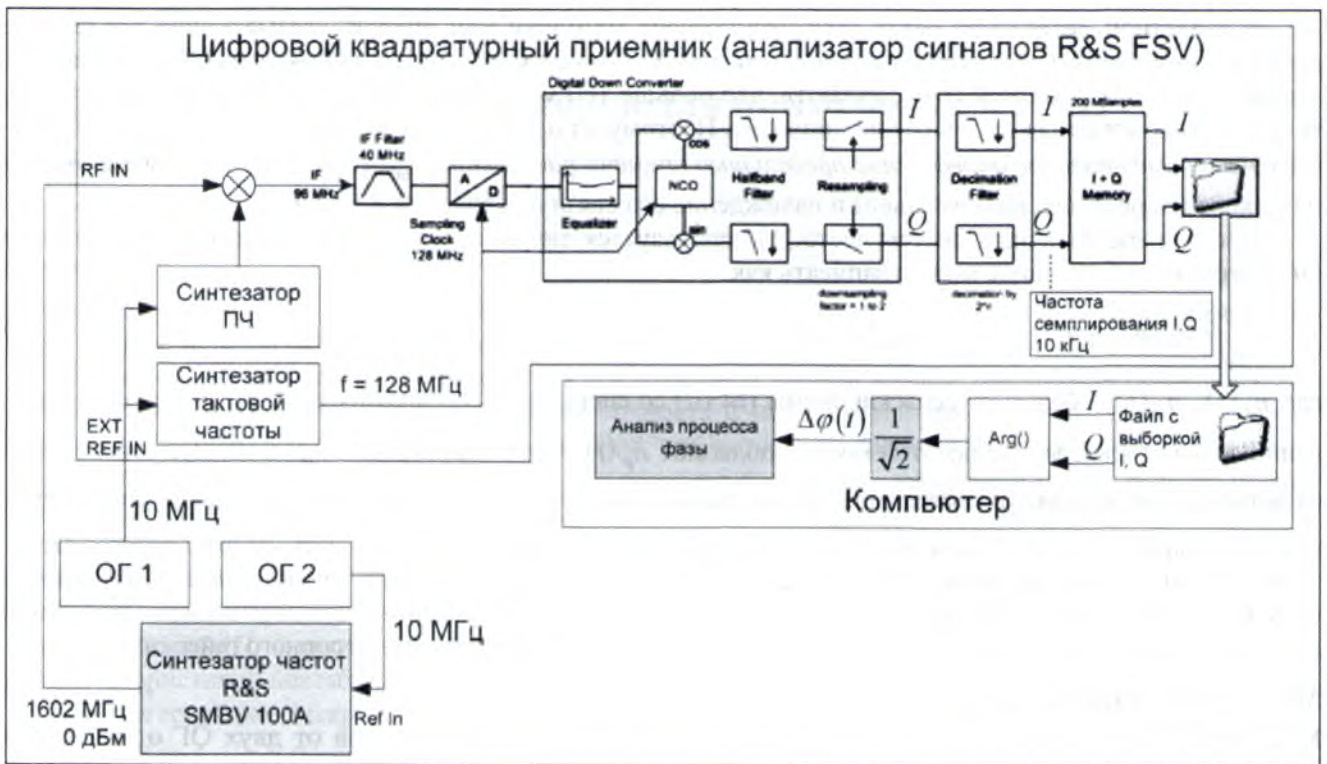


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки для записи и анализа процессов неустойчивости фазы ОГ

Характеристики разработанной установки:

инструментальная среднеквадратическая погрешность измерения процесса разности фаз  $\delta\varphi(t_k)$ :

0,06° (погрешность носит шумовой характер);

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

максимальная длительность выборки: 20000 с (200 Msamples).

Разработанное 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- или 3-го порядка, при которой сохраняется слежение за фазой ОГ (шумы наблюдений отсутствуют).

Девиация Аллана рассчитывается по выборке фазы  $\delta\varphi(t_k)$  в соответствии со своим определением [2].

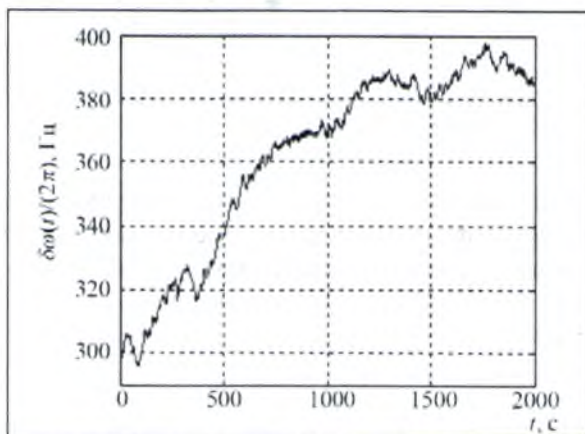


Рис. 4. Типичный вид процесса мгновенной неустойчивости частоты для ОГ ГК-99ТК относительно несущей 1602 МГц

Методика нахождения максимального времени накопления  $T_{acc}$  основана на поиске аргумента первого максимума функции, пропорциональной отношению с/ш (1), что проиллюстрировано рис. 1.

По заданному участку выборки, начиная с отсчета  $m$ , рассчитывается функция, пропорциональная отношению с/ш (1),

$$\hat{q}_N = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=0}^{N-1} \exp \{ j(\delta\varphi(t_{m+k}) - \delta\varphi(t_m) - \omega_m k T) \} \right|^2, \quad (5)$$

где  $T=0,1$  мс – интервал дискретизации;  $\omega_m$  – высокоточная оценка неустойчивости частоты на момент времени  $t_m$  от системы ФАП с полосой 100 Гц.



Величина  $N$  определяется по критерию:  $\hat{q}_{N-1} < \hat{q}_N > \hat{q}_{N+1}$ . Отсюда выборочное значение времени накопления равно  $T_{acc} \langle N \rangle = NT$ . Далее осуществляется переход к следующему участку выборки:  $m = m + N$ , и процесс повторяется, находится следующее выборочное значение  $T_{acc} \langle N \rangle$ . Типичная выборка значений максимального времени накопления для смежных участков выборки фазы  $\delta\varphi(t_k)$  генератора ГК-206ТК показана на рис. 5, гистограмма распределения  $T_{acc} \langle N \rangle$  – на рис. 6.

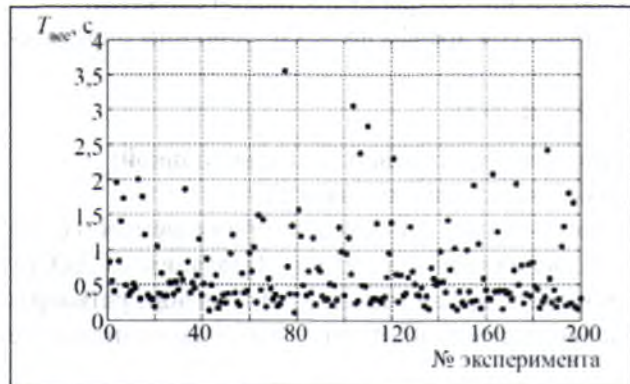


Рис. 5. Выборка значений максимального времени накопления

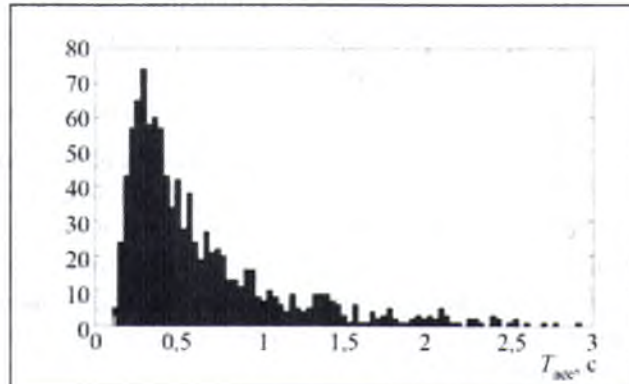


Рис. 6. Гистограмма распределения значений максимального времени накопления

Из анализа распределения значений  $T_{acc} \langle N \rangle$  следует, что существует некое минимальное выборочное значение максимального времени накопления –  $T_{acc,min}$ . При этом гарантируется, что отношение с/ш на выходе коррелятора будет только расти при накоплении на интервале  $T_{acc,min}$ . Поэтому рекомендованным предельным значением времени накопления в корреляторе будем считать минимальное выборочное значение  $T_{acc,min} = \min(T_{acc} \langle N \rangle)$ .

Методика нахождения минимальной полосы ФАП, при которой сохраняются слежения за дрейфом фазы ОГ, основана на подборе. ФАП с адаптивной полосой и дискриминатором вида  $\sin(\Delta\varphi)$  работает по входному воздействию  $\delta\varphi(t_k)$ . Полоса ФАП постепенно сужается, при этом регистрируются факты срыва по выходу ошибки слежения за пределы  $\pm\pi$  рад. При наличии срыва полоса ФАП расширяется на 10%, а ее вектор состояния переинициализируется точными значениями фазы, частоты и фазового ускорения. Далее процесс повторяется. Искомой величиной является выборочное максимальное значение адаптивной полосы, полученной таким способом.

Начальный переходной процесс не рассматривается. Процесс адаптации при нахождении минимальной полосы ФАП, при которой сохраняются слежения за дрейфом фазы ОГ проиллюстрирован на рис. 7, где пунктирной линией отмечено искомое значение полосы ФАП, которое составило в данном случае 5,2 Гц.

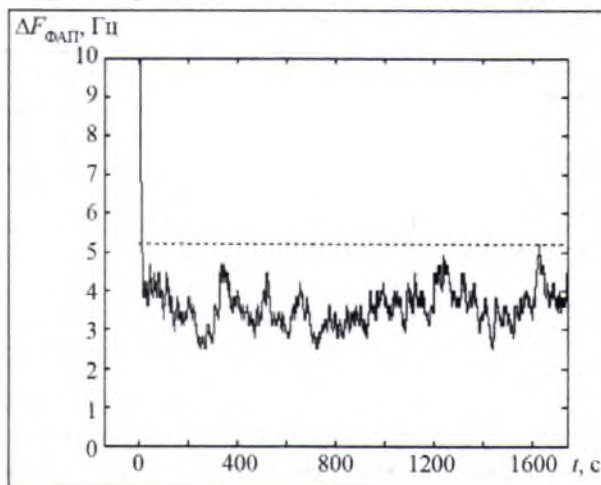


Рис. 7. Процесс адаптации при нахождении минимальной полосы ФАП

### Результаты эксперимента

Для анализа были выбраны следующие термокомпенсированные кварцевые ОГ (ТСХО), применяемые в навигационной аппаратуре потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС):

- ГК-206ТК (Морион, Россия);
- ГК-99ТК (Морион, Россия);
- ГТХО-83 (Golledge, UK).



Также был проведен анализ лабораторного термостатированного кварцевого ОГ (ОСХО), являющегося опцией к прибору R&S SMBV100A.

Измерения проводились в нормальных условиях при комнатной температуре. В ряде случаев учитывалось размещение ОГ:

без корпуса, «на открытом воздухе» – при микроколебаниях температуры, вызванных вентиляцией комнатным воздухом;

в корпусе, заполненным поролоном, где микроколебания температуры существенно снижены.

В результате эксперимента были записаны выборки процессов дрейфа фазы ОГ, а по ним определены следующие характеристики:

девиация Аллана  $\sigma_y(\tau)$  при времени осреднения  $\tau$  0,1, 1 и 10 с;

рекомендованное предельное время накопления в корреляторе, в соответствии с методикой;

минимально допустимая полоса ФАП 3-го порядка, в соответствии с методикой.

Результаты эксперимента приведены в таблице, из которой следует, что для применяемых ТСХО предельное время накопления в корреляторе ограничено величиной 0,1...0,3 с. Изоляция ТСХО от внешних колебаний температуры, в целом, позволяет повысить время накопления, снизив кратковременную нестабильность частоты (девиацию Аллана). Однако существенного выигрыша эксперимент не продемонстрировал.

#### Результаты экспериментальных исследований

Тип ОГ и условия	Длина выборки, с	Объем статистики $T_{acc}$ (число участков выборки)	Предельное время накопления $T_{acc}$ , с	Оценка девиации Аллана $\sigma_y(\tau)$			Минимально допустимая полоса ФАП3, Гц
				$\tau = 0,1$ с	$\tau = 1$ с	$\tau = 10$ с	
ГК-206ТК, без корпуса	5400	9665	0,115	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	6,0
ГК-206ТК, в корпусе	7200	7098	0,17	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	1,5
ГТХО-83 без корпуса	3600	7087	0,1	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$	5,2
ГТХО-83 в корпусе	3600	5286	0,12	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	2,5
ГК-99ТК, без корпуса	3000	1928	0,32	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	1,3
SMBV100A (ОСХО)	3600	722	0,66	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	0,26

С другой стороны видно, что термоизоляция ТСХО дает возможность значительного сужения полосы ФАП в 2...4 раза. Минимально допустимая полоса ФАП для исследованных ТСХО меняется в довольно широких пределах от 1,3 до 6 Гц и сильно зависит именно от термоизоляции.

Более тщательный анализ экспериментальных результатов позволил установить связь между предельным временем накопления, минимально допустимой полосой ФАП и девиацией Аллана для данного типа ОГ. На рис. 8 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующая линия для зависимости предельного времени накопления от девиации Аллана при времени осреднения 0,1 с. На рис. 9. приведены экспериментальные точки и аппроксимирующая линия для зависимости минимально допустимой полосы ФАП 3-го порядка от девиации Аллана ОГ при времени осреднения 1 с.

Зависимости рис. 7–8 представляют практический интерес, поскольку девиация Аллана – паспортная характеристика ОГ. Заметим одну особенность: в случае определения предельного времени накопления следует брать девиацию Аллана при  $\tau = 0,1$  с, а в случае определения минимально допустимой полосы ФАП следует брать девиацию Аллана при  $\tau = 1$  с. Этот эмпирический факт требует математического обоснования.



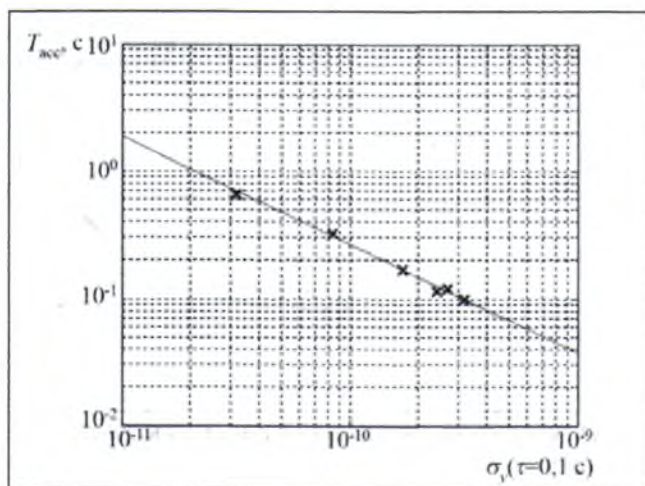


Рис. 8. График экспериментально полученной зависимости предельного времени накопления от девиации Аллана

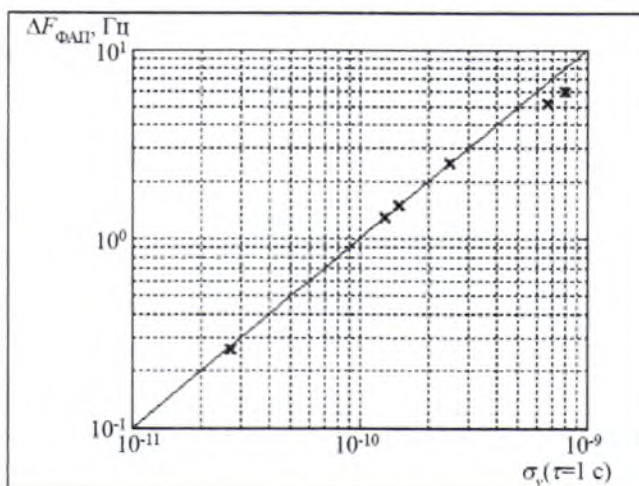


Рис. 9. График экспериментально полученной зависимости минимально допустимой полосы ФАП от девиации Аллана

### Модель дрейфа фазы ОГ

В каждом эксперименте были получены графики зависимости девиации Аллана  $\sigma_y(\tau)$  для времени усреднения  $\tau$  в диапазоне от 0,01 до 100 с. Анализ этих графиков показал, что они не соответствуют модели (3). Для получения приемлемой аппроксимации графиков девиации Аллана модель (3) необходимо уточнить до вида

$$\frac{d\delta\varphi}{dt} = \delta\omega(t) + \omega_{fl}(t), \quad \frac{d\delta\omega}{dt} = D + n_{\omega}(t), \quad (6)$$

где  $\omega_{fl}(t)$  – частотный фликкер-шум со спектральной плотностью  $S(f) = \frac{S_{fl}}{f}$ ,  $D$  – константа, обуславливающая постоянный уход частоты,  $n_{\omega}(t)$  – БГШ со спектральной плотностью  $S_{OG}$ , имеющий тот же смысл, что и в (3).

При модели нестабильности ОГ вида (6), девиация Аллана будет выражаться формулой

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{D^2 \tau^2}{2} + \frac{S_{OG} \tau}{6} + 2 \ln 2 \cdot S_{fl}}. \quad (7)$$

В пользу того, что именно девиацию Аллана следует рассматривать при построении модели ОГ, говорит очевидная корреляция с ней полосы ФАП и времени накопления, представленная рис. 8 и 9.

На рис. 10–15 приведены экспериментальные графики девиации Аллана с аппроксимирующими кривыми вида (7). На рисунках также отражены параметры аппроксимации.

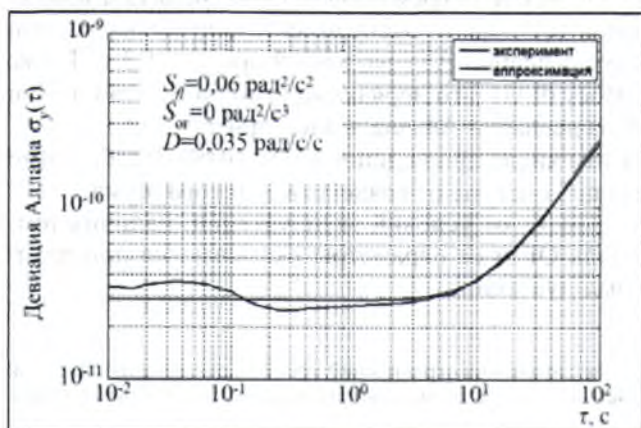


Рис. 10. Аппроксимация девиации Аллана ОГ SMBV-B1H (OCXO)

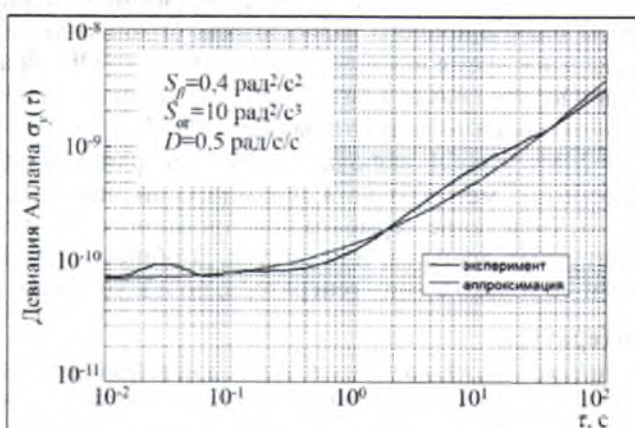


Рис. 11. Аппроксимация девиации Аллана ОГ ГК-99ТК (без корпуса)



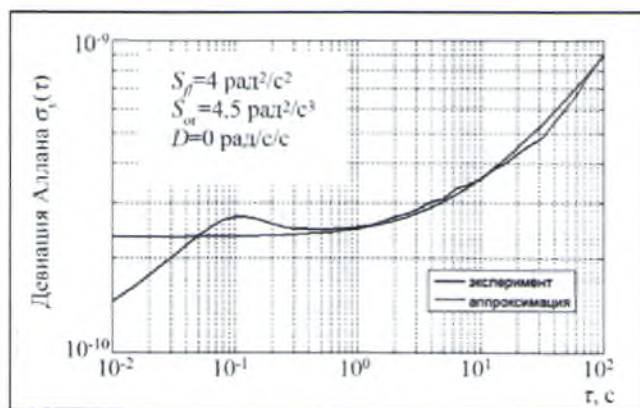


Рис. 12. Аппроксимация девиации Аллана ОГ GTXO-83 (в корпусе)

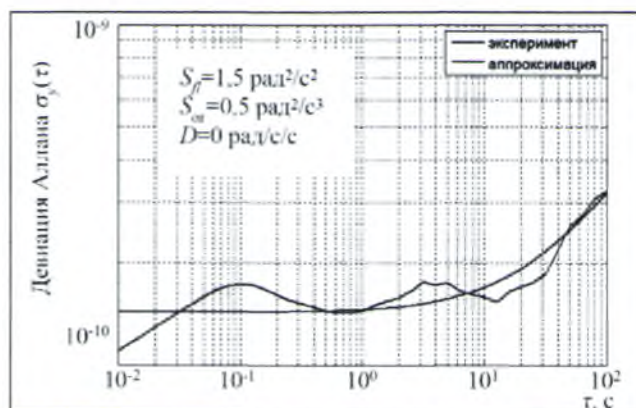


Рис. 13. Аппроксимация девиации Аллана ОГ ГК-206ТК (в корпусе)

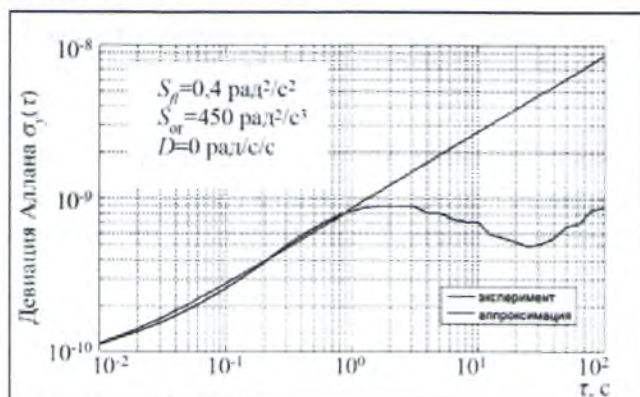


Рис. 14. Аппроксимация девиации Аллана ОГ ГК-206ТК (без корпуса)

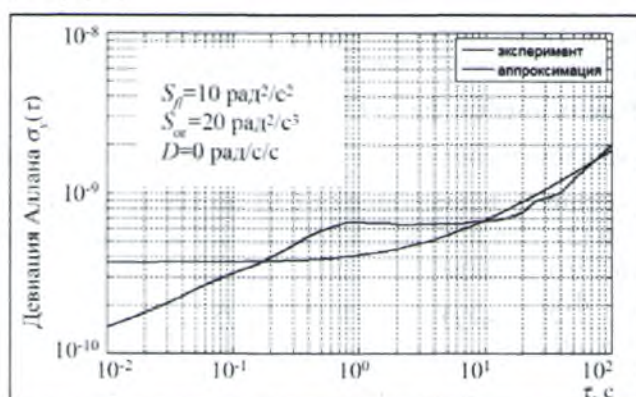


Рис. 15. Аппроксимация девиации Аллана ОГ GTXO-83 (без корпуса)

Как видно из рис. 10–11, более качественные генераторы, к которым относятся эти графики, аппроксимируются предложенной моделью с высокой точностью. Однако предложенная модель не точно описывает опорные генераторы среднего качества, к которым относятся графики рис. 12–15.

Можно показать (выкладки опущены в интересах экономии места), что спад измеренной девиации Аллана в области малых  $\tau$  на рис. 12–15 обусловлен фильтрацией высших спектральных компонент частотного фликкер-шума в низкочастотных цепях ОГ. Учет данного эффекта в модели (6) позволил бы повысить ее соответствие опорным генераторам среднего качества.

## Выводы

1. Для применяемых термокомпенсированных кварцевых ОГ (ТСХО) время накопления пилотной компоненты навигационного радиосигнала ограничено величиной 0,1...0,3 с. Экспериментально выявлено, что предельное время накопления для заданного ОГ обратно его девиации Аллана, взятой при  $\tau = 0,1$  с. Также показано, что применяемые ТСХО ограничивают снизу полосу ФАП 3-го порядка величиной 1,3...6 Гц. При этом минимально допустимая полоса ФАП пропорциональна девиации Аллана, взятой при  $\tau = 1$  с.

2. Модель ОГ включает частотный фликкер-шум (в том числе прошедший через ФНЧ). Необходимо разработать метод расчета динамической ошибки в следящей системе от воздействия такого шума.

3. Поведение термокомпенсированного ОГ сильно зависит от условий эксплуатации: наличия температурных дрейфов, или обдува. В общем случае, модель ОГ и ее параметры оказываются привязанными не только к типу генератора, но и к условиям его эксплуатации.

## Литература

1. Шатилов А. Ю., Болденков Е. Н., Липа И. В. Экспериментальные исследования ограничений времени накопления пилотной компоненты навигационных сигналов, обусловленных нестабильностью частоты опорного генератора // Радиотехника. 2013. №7. С. 116–121.
2. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за 15 лет // ТИИЭР. Т. 66. 1978. № 9.