

**А.В. Хромов, А.С. Котов, С.М. Захаров, С.А. Плешанов,
Н.И. Левашов, Е.А. Кулачек**
ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

СВЧ измерительный блок для исследования параметров атомно-лучевых трубок.

В статье описывается СВЧ измерительный блок для исследования выходных электрических характеристик цезиевой атомно-лучевой трубки (АЛТ) на этапах настройки и производства. С его помощью возможен анализ спектральной линии атомного перехода, измерение долговременной нестабильности частоты. При этом измерительный блок содержит источники питания для АЛТ с цифровым управлением выходными параметрами. Применение измерительного блока позволит упростить процесс настройки и измерения характеристик АЛТ, что снизит трудоемкость производства АЛТ.

Ключевые слова: автоподстройка частоты, атомно-лучевая трубка, стандарт частоты

В качестве рабочих эталонов в метрологических измерениях, а также при производстве высокоточных средств измерений частоты и времени, в радионавигации, радиоастрономии и в других научных сферах используются квантовые стандарты частоты как источники высокостабильных сигналов с долговременной нестабильностью частоты на уровне $10^{-11} \div 10^{-15}$. Ключевым элементом стандартов частоты являются атомно-лучевые трубки (АЛТ) на пучках атомов цезия ^{133}Cs , выпускаемые ФГУП «НПП «Исток». АЛТ выполняет в схеме стандартов частоты роль высокочастотных частотных дискриминаторов [1, 3].

Для обеспечения высоких качественных показателей цезиевой АЛТ, как и любого электронного прибора, необходимо на этапах настройки и производства проводить исследования и измерения электрических характеристик, и, в первую очередь, для АЛТ – это значение среднеквадратического относительного отклонения частоты при измерении в течении одних суток и испытании в течении 10 суток (долговременная нестабильность частоты).

Для измерения среднеквадратического отклонения частоты используется следующая структурная схема измерительного стенда, приведённая на рисунке 1.

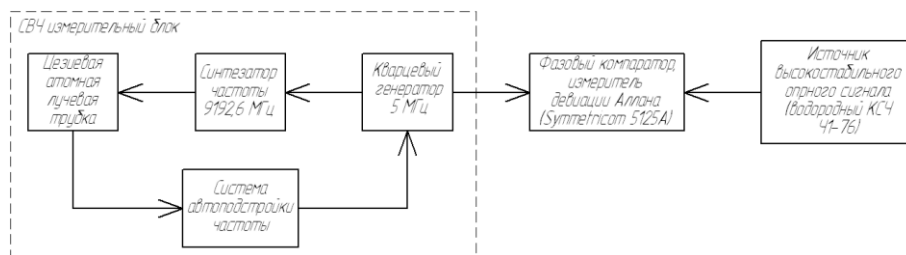


Рисунок 1.

В фазовом компараторе (или измерителе девиации Аллана) сравнивается сигнал кварцевого генератора с опорным высокостабильным сигналом, в данном случае, например, водородного стандарта частоты. Частота сигнала кварцевого генератора подстраивается под частоту основного («часового») перехода цезиевой АЛТ, и,

соответственно, будет иметь долговременную нестабильность частоты, которую способна обеспечить АЛТ. Естественно, при условии, что вся радиотехническая часть (синтезатор частоты и система автоподстройки частоты) не вносит существенного влияния на нестабильность частоты.

Целью настоящей работы явилось создание СВЧ измерительного блока, включающего в себя разработку следующих основных модулей:

1. Высокостабильный СВЧ синтезатор частоты с минимальным шагом перестройки частоты порядка 1 Гц, с возможностью осуществления частотной модуляции (манипуляции) выходного СВЧ сигнала.

2. Устройство автоподстройки частоты (АПЧ) кварцевого генератора под резонансную частоту основного (часового) перехода АЛТ.

3. Регулируемые источники питания АЛТ. В том числе, для источника питания нагревателя источника пучка введена обратная связь для поддержания температуры нагрева источника пучка.

4. Встроенный панельный ПК для управления режимами работы и выходными параметрами всех узлов, а также обеспечения компьютерной обработки измеренных данных.

Структурную схему СВЧ измерительного блока можно упрощенно представить следующим образом (рисунок 2):

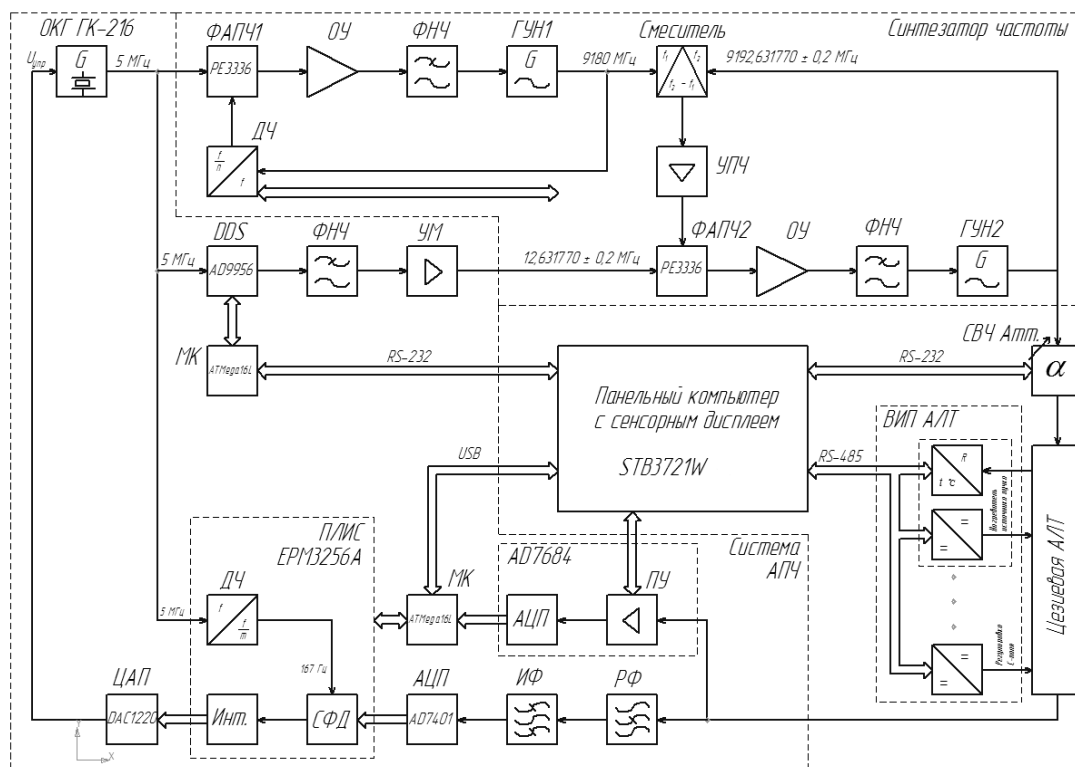


Рисунок 2.

В стандартах частоты типовая схема формирования СВЧ сигнала основана на аналоговом умножении частоты опорного кварцевого генератора и синтезе частоты методом генератора гармоник, что приводит к большому количеству паразитных

составляющих в спектре выходного сигнала. При этом СВЧ узлы (например, генератор гармоник) обычно выполнялись в объёмном волноводном исполнении [1 - 3].

Разработанный синтезатор частоты аналогичен радиотехнической части квантового стандарта частоты, но использует иной метод синтеза СВЧ сигнала. К тому же современный уровень развития СВЧ техники позволяет полностью реализовать синтезатор частоты в гибридно-интегральном исполнении.

СВЧ синтезатор частоты построен на основе двух колец системы ФАПЧ и микросхемы прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS). Первое кольцо ФАПЧ, выполняющее роль СВЧ умножителя частоты, формирует сигнал с частотой 9180 МГц. Второе кольцо ФАПЧ формирует уже заданный диапазон выходных частот $-(9192.631770 \pm 0.2)$ МГц. Диапазон выходных частот синтезатора образуется соответствующим изменением частоты опорного сигнала для второго кольца ФАПЧ. Этот опорный сигнал с частотой $(12,631770 \pm 0,2)$ МГц формируется с помощью модуля, построенного на основе микросхемы прямого цифрового синтеза (микросхема AD9956 фирмы «Analog Devices»). Эта же микросхема позволяет формировать частотно-модулированный сигнал 12,631770 МГц с частотой модуляции 167 Гц.

Применение разработанного синтезатора частоты с малым шагом перестройки 1 Гц и с возможностью частотной модуляции выходного СВЧ сигнала позволяет производить измерение амплитуды сигнала на выходе АЛТ синхронно с изменением частоты выходного СВЧ сигнала синтезатора частоты. Далее, с помощью программного обеспечения производится построение зависимости выходного напряжения АЛТ от частоты СВЧ сигнала, подаваемого на вход АЛТ, в выбранном диапазоне изменения частоты СВЧ сигнала. Экспериментальная характеристика зависимости выходного напряжения АЛТ от частоты СВЧ сигнала представлена на рисунке 3.

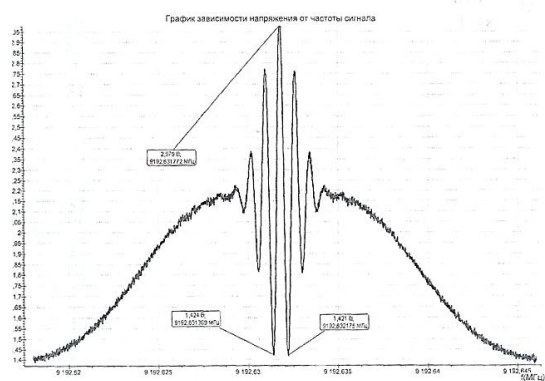


Рисунок 3.

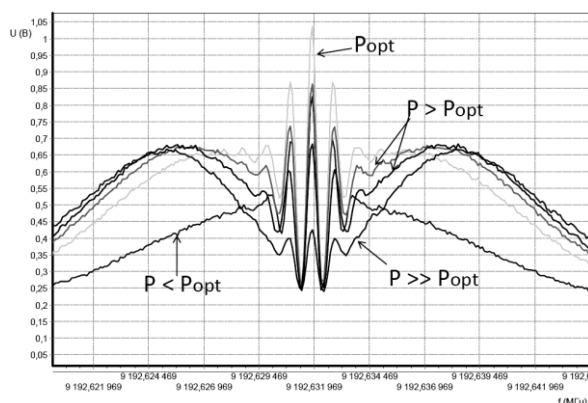


Рисунок 4.

Построение этой характеристики позволяет производить оценку качества настройки АЛТ, измерение ряда электрических параметров АЛТ. Например, по спектральной линии основного (часового) атомного перехода возможно измерение (оценка) ширины спектральной линии, интенсивности резонансной линии и пр.

С помощью СВЧ аттенюатора с цифровым управлением, входящего в состав СВЧ измерительного блока, возможно управление уровнем непрерывной мощности СВЧ сигнала, что позволяет наглядно определить оптимальный уровень мощности СВЧ сигнала, подаваемого на вход АЛТ, для получения наилучшего отношения сигнал/шум (рисунок 4).

Одним из важнейших узлов АЛТ является выходной операционный усилитель, который заменил ранее применяемый вторичный электронный умножитель. К амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) выходного сигнала АЛТ с операционным усилителем предъявляется очень жесткое требование. Для исследования АЧХ выходного сигнала АЛТ снимается зависимость амплитуды выходного сигнала АЛТ от частоты модуляции.

Для измерения долговременной нестабильности частоты необходимо устройство автоподстройки частоты (АПЧ) кварцевого генератора под резонансную частоту основного (часового) перехода АЛТ.

В идеологию такого устройства автоподстройки частоты кварцевого генератора заложена классическая аналоговая схема системы автоподстройки частоты квантовых стандартов частоты, но выполнена на современной элементной базе. При этом синхронный фазовый детектор и интегратор выполнены в цифровом виде, реализованные в ПЛИС EPM3256A фирмы «Altera».

Известно, что АЛТ в квантовом стандарте частоты выполняет роль частотного дискриминатора. При совпадении частоты кварцевого генератора с частотой резонанса основного (часового) перехода в режиме частотной модуляции сигнал на выходе АЛТ представляет собой сигнал с частотой, равной удвоенной частоте модуляции. При отклонении частоты кварцевого генератора от частоты резонанса в выходном сигнале АЛТ появляется составляющая, равная частоте основной гармоники модулирующего сигнала [2, 3].

Первая задача устройства автоподстройки частоты - подавление второй гармоники и выделение первой гармоники выходного сигнала АЛТ. Подавление второй гармоники выходного сигнала АЛТ осуществляется с помощью фильтра на переключаемых конденсаторах, реализованного на микросхеме MAX7410 фирмы «Maxim». Выделение первой гармоники выходного сигнала АЛТ обеспечивается узкополосным избирательным фильтром, также реализованным на микросхеме MAX7490 фирмы «Maxim». Далее сигнал преобразуется в цифровую форму с помощью 16-разрядного АЦП AD7401 фирмы «Analog Devices» и поступает на синхронный фазовый детектор. На второй (опорный) вход синхронного детектора подается сигнал с частотой модуляции, полученный делением частоты сигнала 5 МГц опорного кварцевого генератора. Сигнал ошибки с синхронного детектора усредняется интегратором с постоянной времени порядка 100 мс и затем поступает на 20-разрядный ЦАП DAC1220 фирмы «Texas Instruments». Сигнал с ЦАП после интегрирования подается на управляющий вход опорного кварцевого генератора ГК-216 (ОАО «Морион»), корректируя частоту кварцевого генератора в зависимости от амплитуды и фазы сигнала ошибки, формируемого синхронным детектором.

Для обеспечения питания АЛТ разработаны источники питания с цифровым управлением выходными параметрами от компьютера по протоколу RS-485. Для стабилизации температуры нагрева источника пучка цезия используется обратная связь. В источнике пучка цезия используется терморезистор, сопротивление которого зависит от температуры. Измерение этого сопротивления позволяет программным способом стабилизировать температуру нагрева, регулируя выходное напряжение источника питания.

Управление всеми выходными параметрами и режимами работы как отдельных узлов, так и всего блока в целом, осуществляется с помощью специального программного обеспечения от встроенного промышленного панельного компьютера с сенсорным 9" дисплеем (ПК STB3721W фирмы «Lex System»).

Были получены результаты измерения долговременной нестабильности частоты, приведенные на рисунке 5. Внешний вид СВЧ измерительного блока показан на рисунке 6.

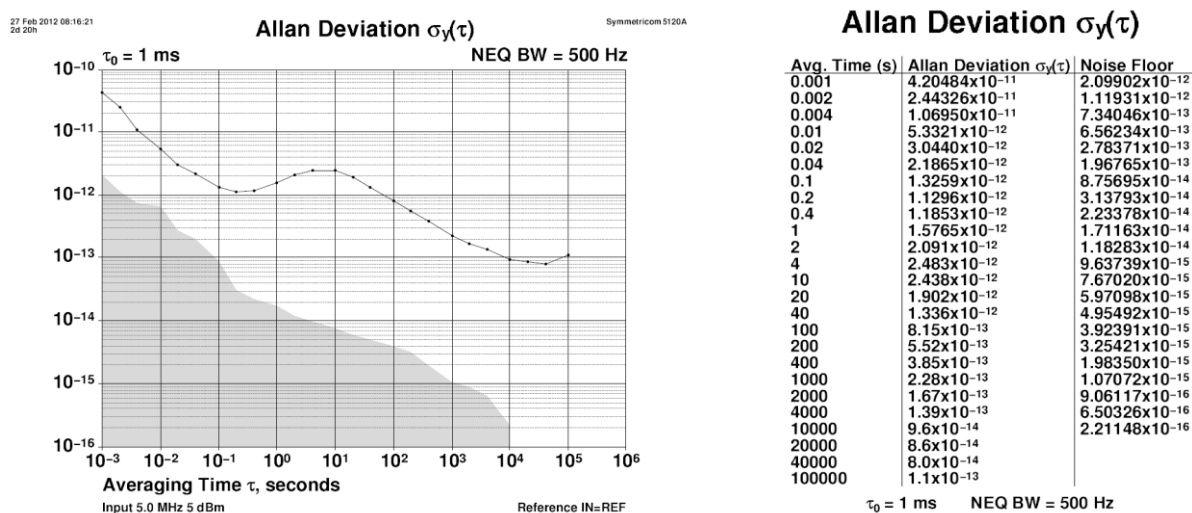


Рисунок 5.

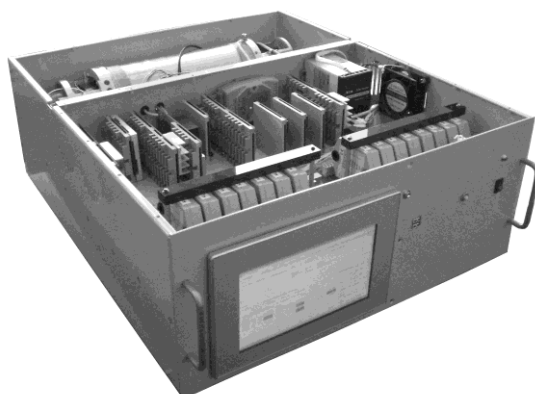


Рисунок 6.

Библиографический список

1. Е.Н. Покровский, Н.И. Волкова, М.С. Доманов, М.П. Лещенко, С.А. Плешанов, И.И. Самарцев, Ю.А. Турутин. «Атомно-лучевые цезиевые трубки» // Электронная техника, Сер. 1, СВЧ – техника, вып. 3(502), 2009г.
2. В.В. Григорьянц, М.Е. Жаботинский, В.Ф. Золин. «Квантовые стандарты частоты», Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1967г.
3. Ф. Риле. «Стандарты частоты. Принципы и приложения», ФИЗМАТЛИТ, 2009г.