

УДК 621.317.76

РАЗРАБОТКА ПЕРЕВОЗИМЫХ КВАНТОВЫХ ЧАСОВ ВОДОРОДНЫХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

**В.П. Сысоев, Ю.С. Самохвалов, С.Н. Овчинников,
Н.И. Нестеров, Н.М. Грачев, М.И. Алексеев,
В.П. Нагирный, А.А. Шаталов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
sysoev@vniiftri.ru,
ovchinnikov@vniiftri.ru*

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработаны перевозимые квантовые часы водородные нового поколения, отличающиеся улучшенными метрологическими характеристиками, повышенной стойкостью к воздействию внешних дестабилизирующих факторов, более высокой технологичностью и надёжностью. Особое внимание уделено уменьшению влияния температуры и внешнего магнитного поля на метрологические параметры прибора.

Ключевые слова: перевозимые квантовые часы, метрологические характеристики.

DEVELOPMENT OF TRANSPORTABLE HYDROGEN QUANTUM CLOCK A NEW GENERATION

**V.P. Sysoev, Y.S. Samohvalov, S.N. Ovchinnikov,
N.I. Nesterov, N.M. Grachev, M.I. Alekseev,
V.P. Nagirniy, A.A. Shatalov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
sysoev@vniiftri.ru,
ovchinnikov@vniiftri.ru*

A new generation of transported quantum hydrogen clock which are characterized by improved metrological characteristics, increased resistance to external destabilizing factors, higher technological effectiveness and reliability are developed by VNIIFTRI. Special attention is paid to reducing the influence of temperature and external magnetic field on the metrological parameters of the device.

Key words: transported quantum clock, metrological parameters.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» в течение последних нескольких лет проводились работы по созданию нового поколения перевозимых квантовых часов водородных (ПКЧВ), предназначенных для высокоточного сравнения шкал времени территориально разнесённых эталонов времени, отличающихся улучшенными метрологическими характеристиками, повышенной стойкостью к воздействию внешних дестабилизирующих факторов, более высокой технологичностью и надёжностью (рис. 1).



Рис. 1. Перевозимые квантовые часы водородные

ПКЧВ выполнены на основе малогабаритного водородного генератора (ВГ) с сапфировой накопительной колбой, устанавливаемой внутри цилиндрического СВЧ-резонатора (рис. 2). Такое размещение колбы, выполненной в виде полого толстостенного цилиндра из монокристаллического лейкосапфира, внутренняя поверхность которого покрывается фторопластом и играет роль накопительного объёма, позволяет уменьшить размеры резонатора. При этом за счёт большой диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 9,8$) электромагнитное поле концентрируется в области лейкосапфира, который обладает очень малыми потерями на СВЧ ($\text{tg}\delta < 10^{-5}$), а удаление диэлектрика от внутренней проводящей поверхности резонатора позволяет снизить потери в стенках резонатора, что даёт возможность при сохранении типа колебания TE_{011} получить добротность резонатора с сапфировой накопительной колбой такой же, как у полноразмерного резонатора при уменьшении его размеров в 2–3 раза [1]. С резонатором такого типа легко выполняются условия генерации ВГ.

Конструктивной особенностью резонатора данного типа является возможность жёсткого закрепления сапфировой накопительной колбы между торцевыми стенками резонатора, что придаёт конструкции узла колба — резонатор чрезвычайно высокую механическую прочность. Это позволяет сделать ВГ малочувствительным к механическим воздействиям и вибрациям, что особенно важно для транспортируемого прибора [2, 3].

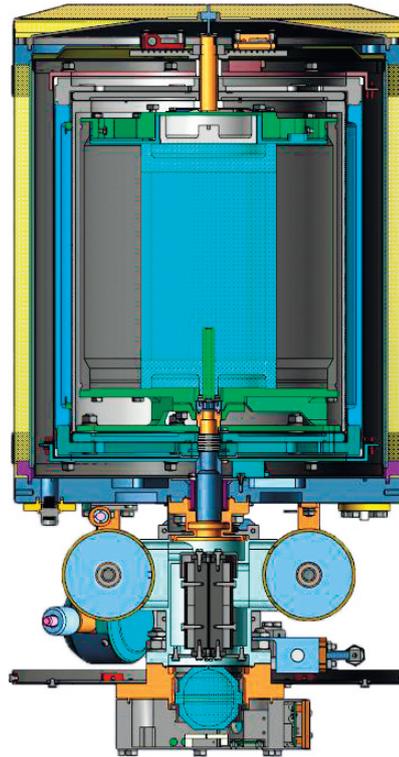


Рис. 2. Конструкция водородного генератора

Существенно изменена конструкция вакуумной камеры ВГ. Она изготовлена полностью из титана. Геттерный насос, служащий для откачки отработанного водорода, выполнен в виде двух цилиндрических труб, приваренных боковыми поверхностями к корпусу камеры. В каждой трубе установлены по одной секции поглотителей водорода, представляющих собой набор шайб из прессованного титанового порошка. Шайбы надеваются на трубку с зазором и снаружи обматываются мелкоячеистой сеткой из нержавеющей стали. Каждая секция устанавливается в трубе вакуумной камеры, закрывается торцевыми крышками и заваривается. Количество титанового порошка в двух секциях геттерных насосов вакуумной камеры обеспечивает непрерывную работу ВГ до 15 лет. Наличие сетки на внешней поверхности геттерного насоса позволяет предотвратить попадание в вакуумную камеру пылевидных частиц, образующихся в процессе поглощения геттером водорода, что важно для транспортируемого прибора.

В центре корпуса вакуумной камеры установлена четырёхполюсная магнитная сортирующая система новой конструкции, эффективность которой увеличена за счёт использования самарий-кобальтовых магнитов и возможности подбора размера зазоров между полюсными наконечниками. Подбором величин зазоров на входе и выходе сортирующей системы удалось уве-

личить мощность генерации за счёт лучшей фокусировки рабочих атомов водорода на входном отверстии накопительной колбы. Использование самарий-кобальтовых магнитов стандартных размеров позволило упростить технологию изготовления магнитной сортирующей системы и уменьшить её массогабаритные параметры. На магнитную сортирующую систему подана заявка на получение патента на изобретение.

Значительной модернизации подвергся узел источника атомов водорода. Он выполнен на отдельном титановом фланце и соединяется с вакуумной камерой с помощью металлического вакуумного уплотнения. Непосредственно источник атомов водорода сделан из кварцевого стекла в виде двух чашек с фланцами и с внутренней полированной полостью сферической формы. Фланцы чашек источника служат для фиксации титановых втулок, которые затем припаиваются свинцом в вакууме к боковым стенкам кварцевых чашек. Далее чашки источника через титановые втулки свариваются с титановым фланцем узла источника. При этом образуется высокогерметичная конструкция соединения кварцевого стекла с титановым фланцем, выдерживающая температуру до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Резонаторная часть водородного генератора также подверглась изменению. Усилено крепление верхней крышки резонатора за счёт дополнительного силового фланца, через который происходит её фиксация к сапфировой колбе и к внутренней поверхности резонатора. Грубая подстройка частоты резонатора осуществляется с помощью резьбового винта, установленного в центральной части крышки, который также жёстко фиксируется через силовой фланец. На верхней крышке резонатора установлены петля варикапа, обеспечивающая плавную подстройку частоты резонатора, и активная петля связи. Смесительная петля связи, служащая для ввода в резонатор зондирующего сигнала системы автоматической настройки резонатора (АНР), установлена на основании резонатора.

В системе терморегулирования применён двухступенчатый термостат. Внешняя ступень термостата имеет три независимые зоны регулирования: верхняя крышка, цилиндр и основание. Внутри неё расположен резонатор с зоной регулирования на его цилиндрической поверхности. Такой двухступенчатый термостат даёт возможность поддерживать температуру резонатора в пределах $\pm 0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ при значительных колебаниях внешней температуры. В новых ВГ дополнительно осуществляется стабилизация теплового потока через цепь размагничивания за счёт термостабилизированного основания, на котором размещён СВЧ-тракт, что улучшает стабильность поддержания температуры резонатора.

Система магнитного экранирования состоит из четырёх магнитных экранов. Между третьим и четвёртым (наружным) магнитными экранами расположен вакуумный колпак, обеспечивающий защиту от влияния внешних климатических факторов, таких как атмосферное давление и влажность воз-

духа. Улучшено магнитное экранирование резонатора за счёт использования двойных торцевых крышек на первом (внутреннем) магнитном экране и применения системы стабилизации продольного магнитного поля.

Система стабилизации продольного магнитного поля выполнена на основе одноосного магниторезистивного датчика магнитного поля, который установлен на печатной плате, расположенной на торцевой крышке вакуумного колпака между третьим и четвёртым магнитными экранами. На этой же печатной плате выполнена схема, обеспечивающая работу датчика. Особенностью магниторезистивного датчика является то, что минимальную зависимость от температуры он имеет при нулевом магнитном поле. Поэтому система стабилизации выполнена так, чтобы в месте нахождения датчика она поддерживала нулевое магнитное поле. Для этого вокруг датчика намотана небольшая вспомогательная обмотка, ток через которую задаёт начальную величину стабилизации магнитного поля. Основная обмотка, стабилизирующая магнитное поле между экранами, намотана на цилиндрическую часть вакуумного колпака. Направление её магнитного поля выбирается противоположным полю вспомогательной обмотки. Следящая система работает таким образом, чтобы создаваемое основной обмоткой магнитное поле компенсировало поле вспомогательной обмотки в области нахождения магниторезистивного датчика. При этом при изменении внешнего магнитного поля следящая система изменяет ток через основную обмотку так, чтобы суммарная составляющая продольного магнитного поля между экранами оставалась постоянной, обеспечивая тем самым стабилизацию магнитного поля. Это приводит к существенному уменьшению влияния внешнего магнитного поля на поле подмагничивания ВГ и, соответственно, на частоту генерации. При четырёх магнитных экранах система стабилизации магнитного поля позволяет получить коэффициент магнитного экранирования ВГ более 10^6 , обеспечивая малое влияние внешнего магнитного поля на частоту генерации.

Съём сигнала генерации с резонатора ВГ осуществляется с помощью активной петли связи. В ней маломощный усилитель СВЧ установлен непосредственно на петле связи резонатора. Питание и съём усиленного СВЧ-сигнала осуществляется через тонкий коаксиальный кабель. Вследствие того, что с усилителя СВЧ снимается сигнал повышенной мощности, влияние потерь в последующих пассивных цепях (кабели, разъёмы, ферритовый вентиль) на коэффициент шума приёмного тракта незначительно и определяется в основном коэффициентом шума усилителя СВЧ. Петля связи и усилитель СВЧ конструктивно выполнены на печатной плате, устанавливаемой в паз цилиндрического корпуса петли, с помощью которого крепится к торцевой крышке резонатора. При этом поле резонатора проникает в паз, образуя электромагнитную связь с выходным сигналом усилителя СВЧ, за счёт чего происходит некоторая положительная обратная связь, частично ком-

пенсирующая потери в резонаторе (регенерация), повышающая его добротность. Это улучшает условия генерации и увеличивает мощность генерации ВГ. В результате применение активной петли связи даёт возможность уменьшить кратковременную нестабильность частоты ПКЧВ в 1,5–2 раза. На активную петлю связи также подана заявка на получение патента на изобретение.

Сигнал с активной петли связи далее поступает на вход тракта СВЧ, состоящего из малошумящего усилителя СВЧ, на входе и выходе которого установлены ферритовые вентили (ФВ). Входной ФВ обеспечивает постоянство нагрузки для активной петли связи, а выходной — для усилителя СВЧ-тракта. Кроме того, через входной ФВ подаётся питание на активную петлю связи. Для уменьшения влияния внешней температуры на параметры тракта СВЧ и, соответственно, на частоту ВГ все его элементы установлены на термостабилизированном основании, которое расположено под вакуумным колпаком между третьим и четвёртым магнитными экранами. Общее усиление активной петли связи и тракта СВЧ составляет 35 dB, обратное затухание — не менее 110 dB.

Требуемую стабильность частоты ПКЧВ на средних и больших интервалах времени обеспечивает система АНР. Она работает по амплитудному критерию настройки с помощью зондирующего сигнала (ЗС), вводимого в резонатор [4]. Зондирующий сигнал образуется в смесителе, выполненном непосредственно на смесительной петле связи СВЧ-резонатора ВГ, из гармоники сигнала отдельного кварцевого генератора КГ АНР, синхронизированного по частоте 100 МГц, и сигналов, вырабатываемых цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) [5]. На вход ЦАП подаётся суммарный код двух частот, генерируемых двумя цифровыми синтезаторами (ЦС), из которых ЦАП вырабатывает два сигнала одинаковой амплитуды с частотами, определяемыми этими кодами. Частоты ЦС выбираются так, чтобы в смесительной петле образовались два сигнала, отстоящие от частоты генерации на полуширину полосы пропускания резонатора $\pm \Delta F$. При этом образовавшийся ЗС, состоящий из двух сигналов строго одинаковой амплитуды, без модуляции и помех на частоте генерации, используется следящей системой АНР для стабилизации резонансной частоты резонатора. Причём мощность ЗС может быть намного больше мощности сигнала генерации без существенного влияния на частоту генерации. Это позволяет системе АНР за счёт большого отношения сигнал/шум стабилизировать частоту резонатора с высокой точностью, обеспечивая высокую долговременную стабильность частоты ПКЧВ.

Прошедший через резонатор ЗС (сигнал АНР) содержит информацию о расстройке частоты резонатора относительно заданной частоты (близкой к частоте генерации), которая содержится в разности амплитуд двух его составляющих. Сигнал АНР снимается активной петлёй связи, усиливается

усилителем СВЧ, преобразуется к промежуточной частоте и подаётся на вход блока автоподстройки частоты резонатора, где он оцифровывается с помощью быстродействующего АЦП и далее обрабатывается цифровым способом по специально разработанной программе. Обе составляющие сигнала АНР выделяются цифровыми фильтрами. Затем определяются их амплитуды, и по разности амплитуд вычисляется сигнал ошибки, который далее интегрируется. Проинтегрированный цифровой сигнал преобразуется цифро-аналоговым преобразователем в напряжение, которое подаётся на варикап для управления частотой СВЧ-резонатора ВГ. В результате следящая система устанавливает такое напряжение на варикапе, при котором амплитуды составляющих сигнала АНР становятся равными, что соответствует настройке резонатора на заданную частоту. Значение частоты настройки резонатора задаётся так, чтобы выходная частота ПКЧВ не зависела от интенсивности пучка атомов водорода.

Построение электронных систем выполнено с учётом минимизации их влияния на частоту ПКЧВ при воздействии внешних дестабилизирующих факторов. Наиболее сильное влияние на частоту ПКЧВ оказывает температура через влияние на систему АНР и систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Поэтому большое внимание уделено разработке этих систем, обеспечивающих нормальную работу ПКЧВ в широком интервале температур. Влияние температуры на систему АНР и ФАПЧ уменьшено за счёт термостабилизации СВЧ- и ВЧ-тракта, связанного с умножением сигнала 100 МГц до 1400 МГц, а также с усилением и фильтрацией сигнала ВГ 1420 МГц и преобразованием его к промежуточной частоте. Далее в блоке автоподстройки частоты резонатора сигнал АНР сразу же переводится в цифровую форму, и его обработка и формирование сигнала управления частотой резонатора производятся по программе. При этом почти весь тракт АНР становится цифровым, на который не оказывает влияние изменение температуры, а узлы, на которые оказывает воздействие температура, термостабилизированы. Влияние температуры на систему ФАПЧ также уменьшено за счёт термостабилизации LC контуров, фильтров и кварцевых резонаторов.

Дальнейшее уменьшение воздействия температуры на частоту ПКЧВ осуществляется за счёт применения термокомпенсации и поддержания теплового режима внутри корпуса прибора путём управления циркуляцией воздуха с помощью двух вентиляторов (один на приток, другой на отток воздуха), управляемых от регулятора температуры.

Шкала времени ПКЧВ формируется путём деления частоты сигнала 10 МГц до 1 Гц. Синхронизация шкалы времени производится по положительному фронту внешнего импульсного сигнала 1 Гц.

Электропитание ПКЧВ осуществляется от сети переменного тока напряжением 100–240 В, частотой 47–440 Гц, а также от сети постоянного тока напряжением 10–36 В. Напряжение переменного тока поступает на вход блока питания сетевого, которое преобразуется в постоянное напряжение 27 В. Это напряжение и напряжение сети постоянного тока поступают на вход блока питания постоянного тока, создающего выходное напряжение 24 В, от которого питаются все цепи ПКЧВ, в том числе выполняется зарядка и подзарядка аккумуляторной батареи, работающей в буферном режиме. Батарея аккумуляторов обеспечивает автономную работу ПКЧВ в течение трёх часов.

Работа основных систем ПКЧВ переведена на цифровую основу, которая осуществляется блоком контроля и управления и блоком индикации.

Блок контроля и управления выполнен на 32-разрядном ARM7 микропроцессоре, который обеспечивает:

- преобразование аналоговых и логических сигналов различных устройств ПКЧВ в цифровую форму;
- обработку этих сигналов и получение измерительной информации о работе ПКЧВ;
- управление различными дискретными устройствами ПКЧВ;
- работу связи с внутренними и внешними устройствами по интерфейсам CAN, RS-485, ГС.

Блок индикации БИ обеспечивает:

- отображение информации о текущем времени и дате;
- отображение информации о состоянии ПКЧВ;
- выработку управляющих сигналов с помощью клавиатуры;
- хранение измерительной информации о работе устройств ПКЧВ;
- работу связи с внешними устройствами через интерфейс Ethernet.

Характеристика ПКЧВ нового поколения приведена в таблице.

Таблица

Характеристика перевозимых квантовых часов

Параметр		Значение
Среднеквадратическое значение напряжения выходных сигналов 5, 10, 100 МГц		$(1 \pm 0,2)$ В при $R_H = 50$ Ом
Выходной импульсный сигнал 1 Гц, положительной полярности, при $R_H = 50$ Ом	$\tau_{и}$	$(10 \pm 0,01)$ мкс
	$\tau_{ф}$	3 нс
	амплитуда	$< 3,5$ В
Диапазон перестройки выходной частоты		$\pm 1 \cdot 10^{-9}$ с шагом $1 \cdot 10^{-15}$

Продолжение таблицы

Параметр		Значение
СКДО выходной частоты в стационарных условиях при времени измерения:	1 с	$2 \cdot 10^{-13}$
	10 с	$4 \cdot 10^{-14}$
	100 с	$1,2 \cdot 10^{-14}$
	1000 с	$4 \cdot 10^{-15}$
	3600 с	$1,8 \cdot 10^{-15}$
	10000 с	$1,5 \cdot 10^{-15}$
	24 ч	$2 \cdot 10^{-15}$
Погрешность хранения шкалы времени при транспортировании в течение 24 ч и ходовом времени 12 ч		< 1,5 нс
Погрешность синхронизации внешними импульсами положительной полярности		< 50 нс
Диапазон рабочих температур		+(5–40) °С
Температурный коэффициент частоты		< $1,5 \cdot 10^{-15}$ 1/К
Магнитный коэффициент частоты		< $1 \cdot 10^{-15}$ 1/Гс
Электропитание	сеть переменного тока	100–240 В (48–440) Гц
	сеть постоянного тока	10–36 В
Потребляемая мощность	при прогреве	< 200 Вт
	в прогретом состоянии	< 100 Вт
Время работы от аккумуляторной батареи		< 3 ч

Из таблицы видно, что технические и метрологические характеристики разработанных во ФГУП «ВНИИФТРИ» перевозимых квантовых часов находятся на уровне лучших мировых образцов [6]:

Таким образом, ПКЧВ нового поколения, созданные на основе конструкций и опыта эксплуатации предыдущих поколений ПКЧВ, вобрали в себя лучшее от них и за счёт использования новых конструктивных решений, современной электронной базы компонентов и широкого применения цифровой и вычислительной техники значительно улучшили технические, метрологические и эксплуатационные характеристики прибора. При этом имеется возможность дальнейшего улучшения этих характеристик за счёт совершенствования имеющегося и разработки нового программного обеспечения.

Литература

1. Гайгеров Б.А. Водородный генератор с малогабаритным резонатором // Измерительная техника. 1986. № 6. С. 8.

2. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С. Активный транспортируемый водородный стандарт частоты с цифровой системой АНР. Исследования по метрологии времени и пространства // Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 50 (142). С. 57–70.
3. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Грачев Н.М., Королев В.П., Алексеев М.И., Пентин С.А. Перевозимые квантовые часы на основе активного водородного генератора // Труды 6 Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 17–19 сентября 2012. С. 126–139.
4. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П. Автоматическая настройка резонатора Н-мазера для бортового применения // Труды 5 Российского симпозиума «Метрология времени и пространства». 11–13 октября 1994. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 242–245.
5. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Овчинников С.Н., Нестеров Н.И., Грачев Н.М., Алексеев М.И., Нагирный В.П., Шаталов А.А., Шилов К.К. Перевозимые квантовые часы водородные нового поколения // Доклады IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 12–14 сентября 2018. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 177–185.
6. Воронцов В.Г., Беляев А.А., Демидов Н.А., Поляков В.А., Сахаров Б.А. Перевозимые квантовые часы нового поколения на основе активного водородного стандарта частоты и времени // Доклады IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 12–14 сентября 2018. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 21–28.