

УДК 528.15

**МОДУЛЯЦИОННЫЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ  
ВАРИОМЕТР С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ  
НА НЕКОНТАКТНОМ ПОДВЕСЕ, ФАБРИ-ПЕРО  
ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ И СИСТЕМОЙ  
ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

**А. И. Сорока**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
sorokaai@mail.ru*

*В статье говорится о проведённых исследованиях разработок модуляционных гравитационных вариометров. Делается вывод о целесообразности продолжить разработки отдельных вариантов МГВ для использования дистанционного зондирования недр Земли и других объектов.*

*Ключевые слова: модуляционный гравитационный вариометр, исследования, конструкция, использование.*

**MODULATION GRAVITATIONAL VARIOMETER WITH  
A SENSITIVE ELEMENT ON A NON-CONTACT SUSPEN-  
SION, FABRY-PEROT INTERFEROMETER AND OPTIMAL  
SIGNAL PROCESSING SYSTEM**

**A.I. Soroka**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region  
sorokaai@mail.ru*

*The article talks about the research carried out on the development of modulation gravitational variometers. It is concluded that it is expedient to continue the development of separate variants of the MGV for using remote sensing of the Earth's interior and other objects.*

*Key words: modulation gravitational variometer, research, design, using.*

Известны модуляционные гравитационные вариометры (МГВ), в которых чувствительные элементы выполнены по квадрупольной схеме в виде спаренных ортогональных гантелей или прецизионных линейных акселерометров типа ротационных гравитационных вариометров А. А. Красовского – Р. Л. Форварда или ротационных акселерометрических вариометров фирмы Bell Aerospace [1, 2].

В конструкциях отечественных МГВ, построенных в виде экспериментальных образцов РГВ – 4, 5, 6 и прошедших лабораторно-стендовые испытания [3, 4] реализовано достижение чувствительности измерений 0,1 – 0,5 Этвеш и обеспечена погрешность измерений 13–15 Этвеш (1 Этвеш =  $10^{-9} \text{г с}^{-2}$ ); сниже сигнала и инерциальных помех типа подшипниковых и других; использованы многослойные защитные экраны от магнитных и

электрических помех и наводок; применены оригинальные оптронно-световодные измерители микроперемещений чувствительного элемента [5].

С целью достижения чувствительности измерений в 0,01 – 0,1 Этвеш, погрешности измерений 0,5 – 1,0 Этвеш и увеличения быстродействия до 0,1 – 0,5 с разработана и тщательно рассчитана конструкция электростатического МГВ.

На рис. 1, 2 видно, что измерение субангстремных относительных колебаний гантелей 2 на резонансной частоте  $2\Omega_p$  производится с помощью интерферометра Фабри-Перро посредством поляризованного лазерного луча 15, 7, претерпевшего внутри ротора несколько отражений от призмы 4, 5, установленных на гантелях. Лазерный луч, выходящий из ротора, интерферирует с опорным лучом 17 и попадает на экран ФЭУ - 18. Относительные поступательные колебания ротора в электростатических опорах не сказываются на полезном сигнале, поскольку имеют другую несущую частоту. В системе оптимальной обработки сигналов, реализующей фильтр Калмана-Бьюси (ФКБ), как следует из его структурной схемы (рис. 2), используется опорный сигнал вращения ротора  $U_{оп.}$ , который снимается фотодатчиками 14. Сигнал невязки  $\Delta z$  с выхода ФЭУ поступает на два блока вычислителя 22 и 23, работающих циклически. Третий блок микропроцессорного вычислителя 24 представляет собой блок памяти, в котором хранятся функции  $P_{ij}(\tau)$  ( $\tau$  - время, отсчитываемое с начала очередного цикла). Между блоками существует информационный обмен, указанный стрелками.

На выходе блока 22 формируется сигнал ОС  $U_{ос}$ , который подаётся в нужные моменты времени (при определённой фазе вращения) на электроды электростатической ОС 13. Эти электроды расположены в экваториальном поясе ротора и создают радиальные усилия (периодически сжимают или растягивают ротор). Эти усилия через исключительно малые деформации тонкой сферической оболочки ротора передаются на гантели, замыкая ОС. В оптимальном вычислителе в течение каждого цикла циркулирует сложные комбинации сигналов. Оценки измеряемых величин  $\hat{W}_\Delta$ ,  $\hat{W}_{xy}$ , выставляемые в начале каждого очередного цикла относительно, произвольно снимаются в конце цикла ФКБ 21, 24. Предельную точность определения градиентов МГВ необходимо вычислить через диагональные элементы ковариационной матрицы  $P$  в конце каждого цикла. При  $\Theta_{cycle} = \Omega_p t_{cycle} \gg 1$  СКО ошибок оценивания градиентов приближённо равна:

$$\sigma_{\dot{w}} = \Omega_p \lambda / \rho t_{\text{cycle}} (6 / n_{\text{etcycle}})^{0.5}.$$

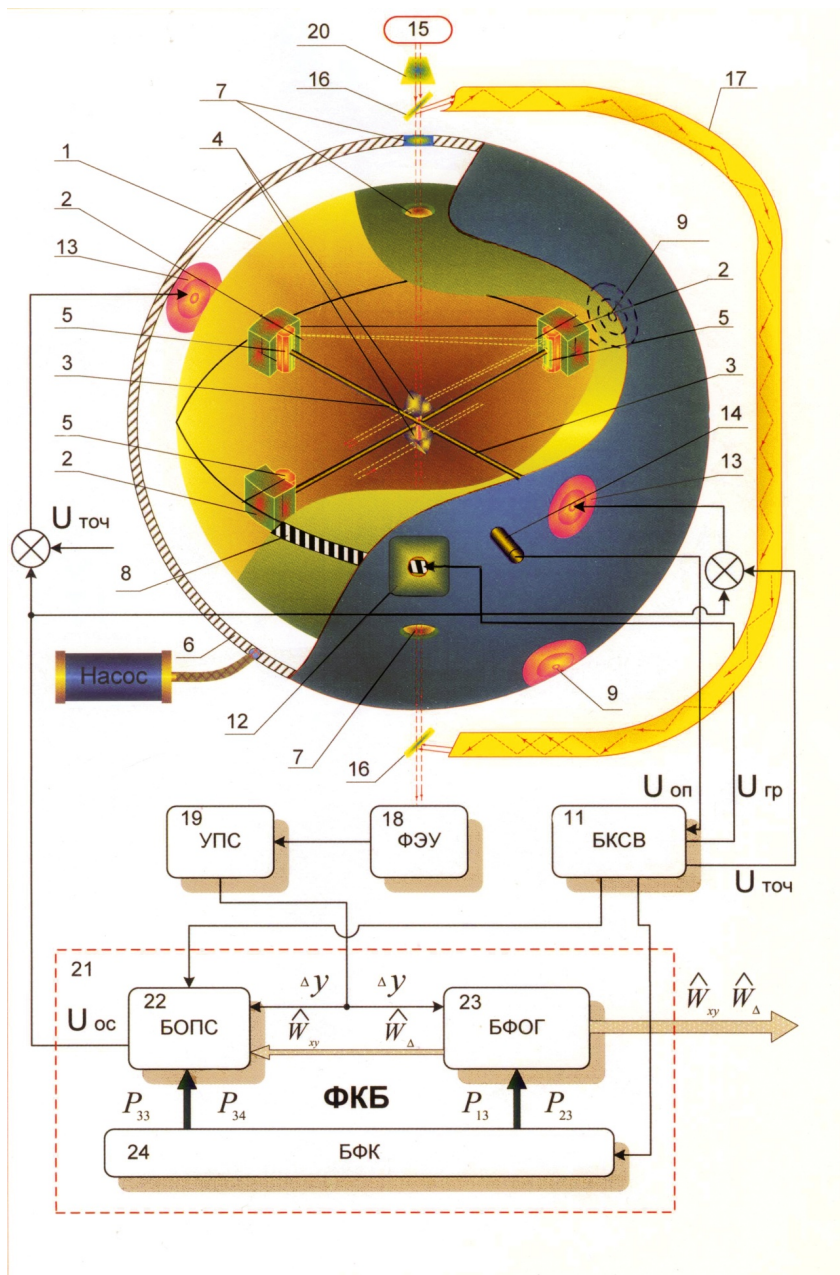


Рис. 1. Конструктивная схема МГВ

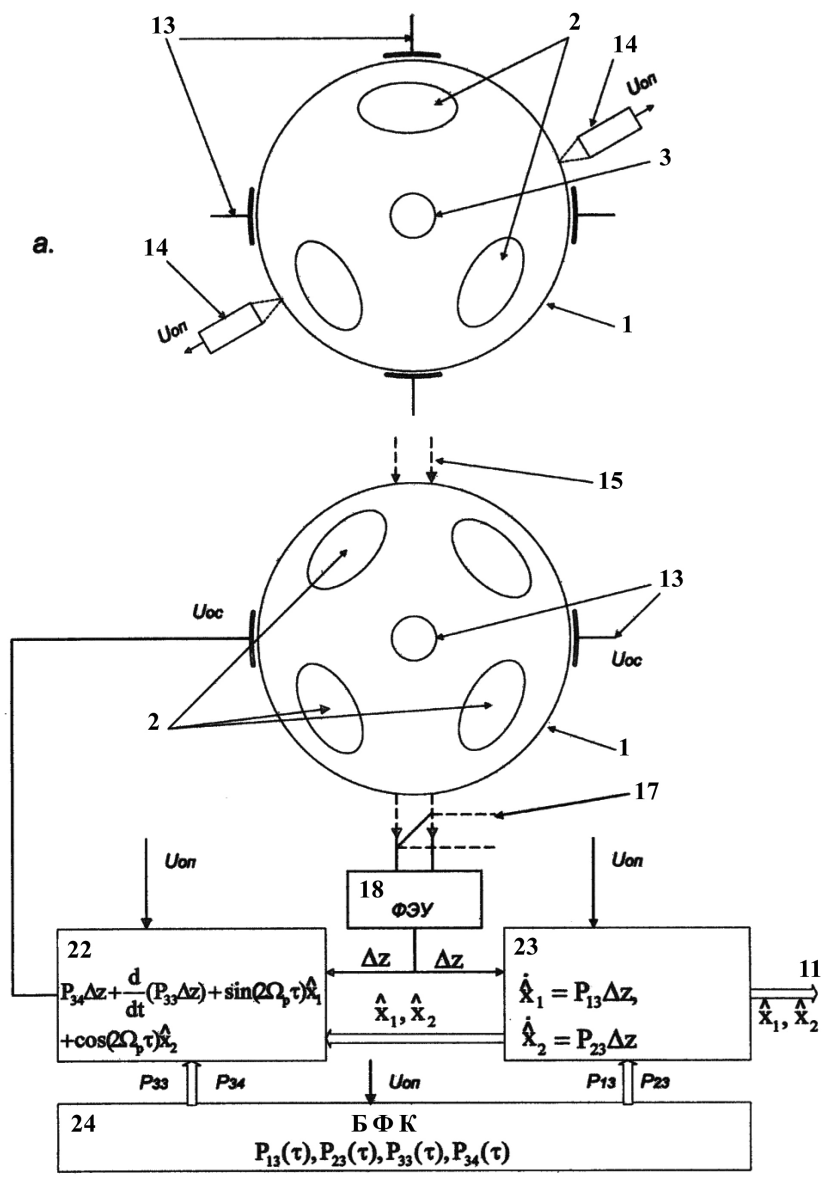


Рис. 2. Структурная схема фильтра Калмана-Бьюси МГВ

Минимальная погрешность измерений электростатического МГВ (в Эт-вешах), полученная путем статистических испытаний, приведена в таблице.

1. Исследования проводились для электростатического МГВ, имеющего следующие параметры:

- частота вращения 10 – 100 Гц;
- мощность лазерного источника излучения 10 -100 мкВт;
- длительность цикла оценивания 1 – 10 с;
- общая масса ротора 100 г;
- общая масса гантелей 60 г;
- радиус инерции гантелей 3 см;
- база лазерного луча в экваториальной плоскости ротора 6 см;
- длина волны используемого излучения 0,63 мкм;
- СКО ошибок измерения МГВ в зависимости от длительности цикла оценивания и величины частоты вращения ротора МГВ достигает от 0,001 до 1,3 Этвеша.

Таблица

| Частота вращения ротора МГВ<br>$\Omega_p / 2\pi$ Гц | Мощность лазера<br>$P_e, 10^{14} \text{ c}^{-1}$ | Длительность цикла оценивания<br>$t_{\text{cycle}}, \text{ c}$<br>(1с) | Длительность цикла оценивания<br>$t_{\text{cycle}}, \text{ c}$<br>(3с) | Длительность цикла оценивания<br>$t_{\text{cycle}}, \text{ c}$<br>(7с) | Длительность цикла оценивания<br>$t_{\text{cycle}}, \text{ c}$<br>(10с) |
|---|--|--|--|--|---|
| 10  | 1  | 0,2376   | 0,0542   | 0,0125   | 0,0025  |
| 10  | 10   | 0,0732   | 0,0127   | 0,0042   | 0,0011  |
| 70  | 1  | 0,4846   | 0,0874   | 0,0244   | 0,0144  |
| 70  | 10   | 0,1642   | 0,0286   | 0,0086   | 0,0054  |
| 100   | 1  | 1,2920   | 0,2524   | 0,0753   | 0,0412  |
| 100   | 10   | 0,4787   | 0,0788   | 0,0237   | 0,0109  |

Согласно данным таблицы, видно, что большие частоты вращения  $\Omega_p$  ротора МГВ определяют его высокие пороги чувствительности измерений. Увеличение мощности излучения лазера снижает пороги. В то же время малые  $\Omega_p$  предъявляют повышенные требования к факторам влияния на эксцентричную крутильную систему ЧЭ МГВ вибрационных возмущений.

Для уменьшения влияния на работу МГВ подшипниковых и других инерциальных помех успешно реализован неконтактный электростатический подвес его чувствительного элемента.

С целью обеспечения предельных минимальных СКО измерений МГВ путём снижения термодинамических (тепловых) шумов его ЧЭ и уменьшения влияния квантовых фотонных помех оптико-электронной системой съёма полезного сигнала разработаны конструктивные схемы криогенного и сверхпроводящего МГВ с неконтактным подвесом их чувствительных эле-

ментов (рисунки 3, 4). В отличие от известных зарубежных сверхпроводящих МГВ [8] в отечественных аналогичных приборах применены высокочувствительные и помехоустойчивые оптронно-световодные датчики [5, 9] и интерферометры Фабри-Перро вместо традиционных СКВИДов, создающих электромагнитные помехи и наводки.

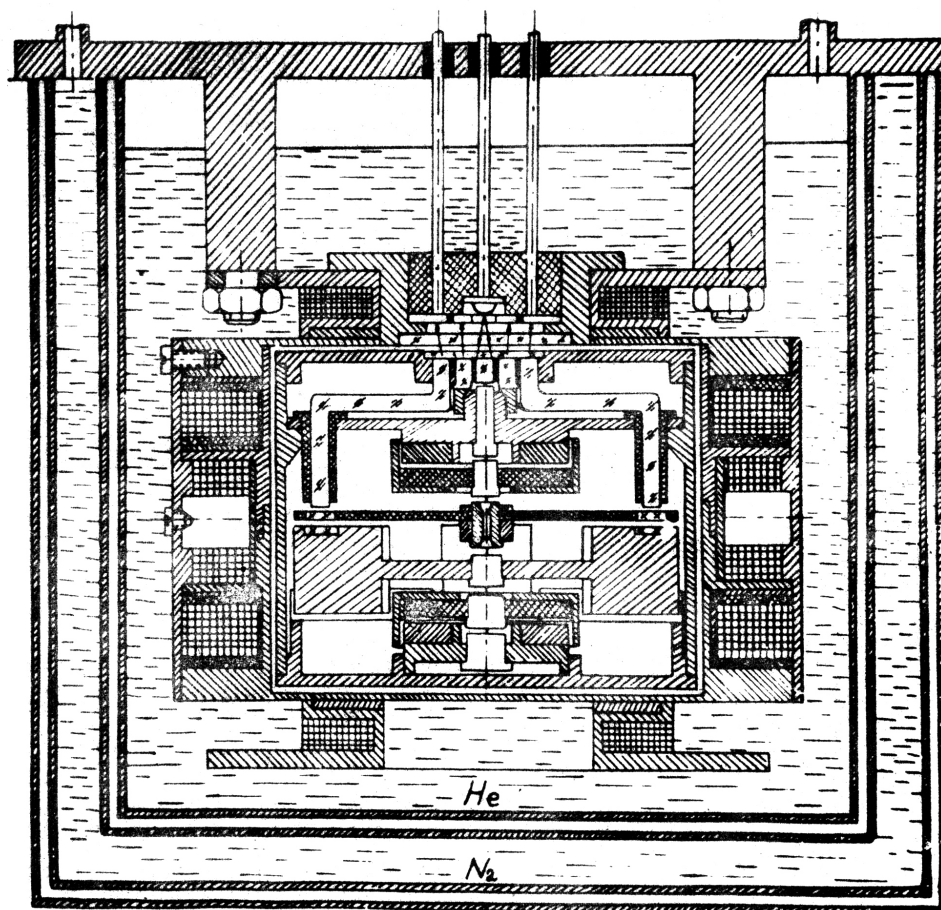


Рис. 3. Конструктивная схема криогенного МГВ

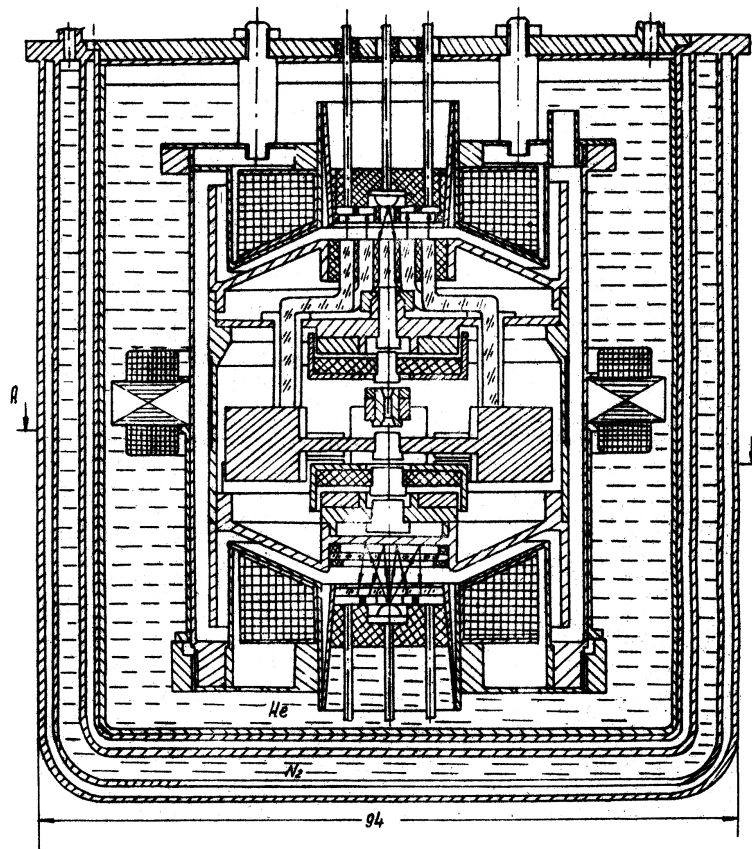


Рис. 4. Конструктивная схема сверхпроводящего МГВ

Были проведены лабораторно-стендовые испытания отдельных узлов и всего макета сверхпроводящего МГВ (рисунок 4), показавшие его работоспособность и перспективность отдельных технических решений узлов и систем. Дальнейшее развитие сверхпроводящих МГВ требует соответствующей кооперации заказчиков и исполнителей.

#### Выводы

1. Проведённые исследования разработок модуляционных гравитационных вариометров с неконтактным (электростатическим и сверхпроводящим) подвесом их чувствительных элементов и системой оптимальной (циклический фильтр Калмана-Бьюси) обработкой выходных полезных сигналов по-

зволяют обеспечить пороговую разрешающую способность измерений в пределах  $10^{-4}$  –  $10^{-3}$  Этвеш, высокое быстродействие (1–10 с) и помехоустойчивость работы.

2. Целесообразно продолжить исследования и разработки отдельных вариантов МГВ с неконтактным подвесом их чувствительных элементов с последующим их использованием для эффективного дистанционного зондирования недр Земли и других естественных и искусственных объектов.

### Литература

1. Сорока А. И., Фатеев В. Ф., Попадъев В. В. Перспективы развития космической гравиградиентометрии на основе торсионных механических колебательных систем // Альманах современной метрологии. 2015. №3. С. 69-83.
2. Bell R. E. Gravity gradiometry. Scientific American, Inc. June 1998. P. 74-79.
3. Сорока А. И. Вариометр гравитационный. Авторское свидетельство СССР № 90607, кл. G01V7/02, зарегистрировано в Госреестре 13.12.1973.
4. Августов Л. И., Сорока А. И. Бортовой гравивариометр. Опыт разработки и результаты стендовых испытаний // Мехатроника, автоматизация, управление. № 3. 2009. С. 51-56.
5. Сорока А. И. Оптронно-световодные датчики перемещений чувствительных элементов гравиинерциальных измерительных систем. Навигация по гравитационному полю Земли и её метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции, 14-15 февраля 2017 г., Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2017. С. 283-296.
6. Красовский А. А., Рыженин В. Г., Рябченко В.Н., Сорока А. И. Модуляционный гравитационный вариометр с электростатическим подвесом чувствительного элемента и Фабри-Перро интерферометром. Авторское свидетельство СССР № 311852, кл. G01V7/02, зарегистрировано в Госреестре 02.04.1990.
7. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Издательство научной литературы Н. Ф. Бочкаревой. 2006. С. 559–563.
8. Джилавдари И. З., Ризноокая Н. Н. Этапы развития и состояние разработок гравитационных гравивариометров для подвижных объектов (обзор)// Приборы и методы измерения. 2016. Т. 7. С. 235-246.
9. Пустовойт В. И. Избранные труды. Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН. – М.: Наука. 2014. С. 28-31.