Система считывания на основе СКВИД-магнитометра для инерциальной навигационной системы

А. В. Ржевский,[1,2,a] О. В. Снигирев,[1,3,4] Ю. В. Масленников,[5] В. Ю. Слободчиков[6]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики полупроводников и криоэлектроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

[2] *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.*

[3] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Центр квантовых технологий. Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 1, стр. 2.*

[4] *НИЦ «Курчатовский институт». Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

[5] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН). Россия, 108840, Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4.*

[6] *Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН. Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.*

Поступила в редакцию 16.03.2020, после доработки 30.03.2020, принята к публикации 10.04.2020.

Исследованы характеристики системы считывания на основе СКВИД-магнитометра для инерциальной навигационной системы (ИНС), использующей сверхпроводящий гироскоп. Рассчитана и измерена функция преобразования угла поворота имитатора гироскопа в напряжение на выходе магнитометра, имеющая значение, близкое к 6.5 мВ/град. Данное значение соответствует 4.1 В/град для сверхпроводящего гироскопа с диаметром ротора 30 мм. Измерены дрейфы нуля напряжения на СКВИД-магнитометре длительностью до 8 ч, зафиксирован дрейф на уровне 10^{-6} град/ч.

Ключевые слова: СКВИД, сверхпроводимость, инерциальные навигационные системы.
УДК: 538.945, 621.317.445. PACS: 85.25.Dq.

ВВЕДЕНИЕ

Успешный запуск космической миссии Gravity Probe B (GPB) с навигационной системой на основе сверхпроводящих гироскопов и считыванием изменений направлениях осей вращения с помощью сверхпроводящих квантовых магнитометров (СКВИДов) с результирующим уровнем дрейфа сигнала 10^{-11} градуса за час [1] вызывает интерес к созданию аналогичной автономной наземной инерционной навигационной системы (ИНС). Этот интерес обусловлен тем, что современные наземные ИНС имеют уровень дрейфа 10^{-3}–10^{-4} градуса в час [2] и улучшение их основной характеристики даже на 3–4 порядка очень актуально.

Общая идея работы ИНС на базе сверхпроводящего гироскопа может быть описана следующим образом. При переходе вещества в сверхпроводящее состояние часть электронов формирует куперовские пары, двигающиеся в веществе «без трения» — без рассеивания на кристаллической решетке с потерей энергии. При вращении свободно подвешенного гироскопа в сверхпроводящем состоянии куперовские пары не вращаются вместе с телом, так как не взаимодействуют с кристаллической решеткой. При этом вращательное движение положительно заряженных ионов кристаллической решетки создает магнитный момент, сонаправленный с осью вращения гироскопа [3] и сохраняющий свое направление в пространстве, называемый моментом Лондона. Таким образом, возможно считывание изменения положения транспортного средства, на котором установлена ИНС подобной конструкции, относительно неизменного направления магнитного момента. Для этого необходимо в транспортном средстве в непосредственной близости от электростатически подвешенного гироскопа разместить сверхпроводящую петлю, в которой будет индуцироваться ток при изменении магнитного потока через петлю, то есть при повороте транспортного средства.

Однако есть существенные отличия ИНС наземного базирования от ИНС, работающей в условиях микрогравитации, усложняющие задачу. Во-первых, требуются существенно большие значения напряжения в системе электростатического подвеса сверхпроводящей сферы — ротора гироскопа, что негативно влияет на чувствительность системы регистрации. Во-вторых, для достижения максимальной чувствительности ИНС требуется перенести сигнал из области ультранизких частот, характерных для сигнала ИНС, в область белого шума СКВИДа. В космическом эксперименте для этого использовалось вращение спутника вокруг направления движения [1]. В наземных условиях для этого требуется разработка более сложной системы модуляции сигнала.

Поскольку дрейф напряжения системы считывания (СКВИДа и его управляющей электроники) неотличим от медленного изменения направления оси гироскопа, необходимо изучение низкочастотного дрейфа выходного напряжения СКВИД-магнитометра в наземных магнитно-шумных условиях и способов его компенсации, что особенно важно для создания системы регистрации менее сложной и менее дорогой по сравнению с использовавшейся в проекте Gravity Probe B [1]. Данная работа направлена на решение названной задачи и получение оценок ошибок ИНС, обусловленных СКВИДом.

[a] E-mail: rzhevskiy.aleksandr@physics.msu.ru

В первом разделе статьи описываются экспериментальная установка и методология измерений, во втором разделе приведены результаты измерений дрейфа нуля напряжения на СКВИДЕ, в третьем разделе рассмотрена возможность уменьшения влияния дрейфа напряжения на выходной сигнал за счет модуляции сигнала сверхпроводящего гироскопа.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДОЛОГИЯ

Для нахождения передаточной функции (функции, преобразующей угол отклонения ротора гироскопа в выходное напряжение СКВИДа) и уровня шумов был разработан экспериментальный стенд, эквивалентная схема которого представлена на рис. 1, *а*. Данный макет соответствует общей идее работы ИНС на основе сверхпроводящего гироскопа (рис. 1, *б*).

Безазотный стеклопластиковый гелиевый криостат имел емкость 11.3 л и скорость испарения жидкого гелия менее 1.1 л в сутки, уровень собственных шумов — 1.5 фТл/Гц$^{1/2}$. Криогенный зонд измерительной установки, погружаемый во внутреннюю колбу криостата, включал узел размещения имитатора ротора криостата, узел размещения СКВИД-датчика CE2blue производства фирмы SUPRACON, внешний свинцовый сверхпроводниковый экран для экранирования внешних помех, соединительные кабели

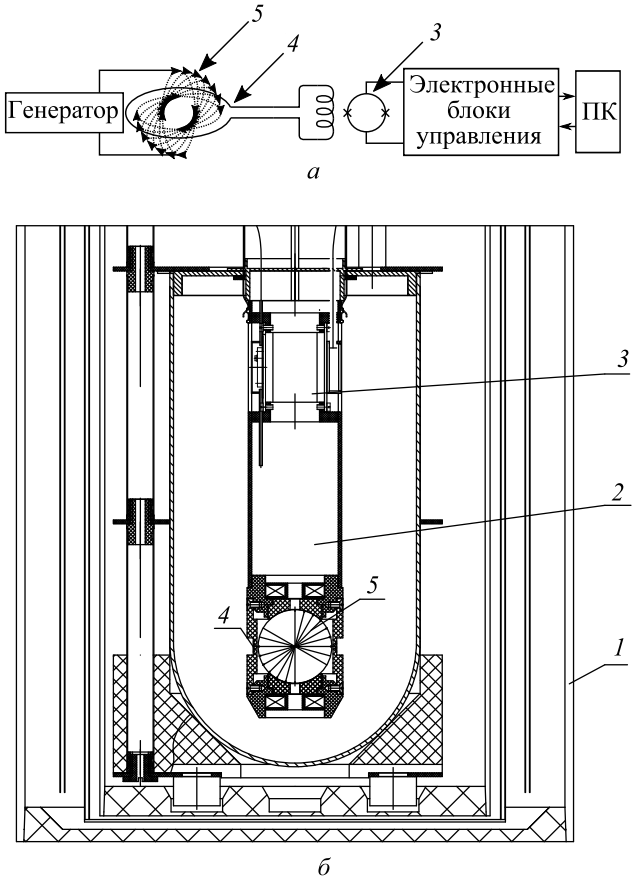

Рис. 1. Эквивалентная схема (*а*) и схема экспериментальной установки (*б*): *1* — криостат; *1* — измерительный зонд; *3* — ампула СКВИД-датчика; *4* — приемный виток магнитометра; *5* — имитатор ротора

внутри тонкостенной трубки из нержавеющей стали и капку с электрическими разъемами для соединения СКВИД-датчика и цепей тестового сигнала с электронными блоками СКВИД-магнитометра и контрольно-измерительными приборами, находящимися при комнатной температуре.

Имитатор ротора сверхпроводящего гироскопа представлял собой шар из текстолита диаметром 30 мм, по большим окружностям которого были размещены 9 сдвоенных витков из медного провода, расположенных через 15°C друг от друга в диапазоне от −30 до 90°C для имитации сигнала при различной ориентации магнитного момента Лондона вращающейся сверхпроводящей сферы. Сигнал в витки, размещенные на шаре, подавался от генератора звуковой частоты через разделительный трансформатор с коэффициентом передачи $K_{\text{тр}} = 1/1.6$, отвязывающий землю генератора и резисторную цепь с сопротивлением 220 кОм.

Тонкопленочный СКВИД-датчик CE2blue имел следующие характеристики: собственная индуктивность СКВИДа $L \sim 180$ пГн, индуктивность входной катушки $L_i \sim 0.42$ мкГн, коэффициент преобразования входного тока в магнитный поток в СКВИДе ~ 0.26 мкА/Φ_0 (Φ_0 — квант магнитного потока), критический ток $I_c \sim 20$ мкА, нормальное сопротивление $R_n \sim 3$ Ом, размах сигнальной характеристики $\Delta V \sim 30$ мкВ, собственное разрешение СКВИДа $\delta\Phi_n \sim 3.0$ мкΦ_0/Гц$^{1/2}$. Подложка со СКВИД-датчиком размещалась в узле размещения датчика внутри собственного сверхпроводящего экрана из свинца. К сверхпроводящим терминалам входной катушки СКВИДа подключалась приемная петля из тонкого ниобий-титанового провода, размещенная на «экваторе» текстолитового шара, образуя вместе с входной катушкой трансформатор магнитного потока. Имитатор ротора гироскопа и узел размещения СКВИД-датчика находились во внешнем свинцовом сверхпроводящем экране.

Из характеристик СКВИД-датчика CE2blue и размеров приемной петли следует, что созданная система должна иметь предельный уровень шумов 0.12 фТл/Гц$^{1/2}$. Как показали измерения в условиях лаборатории в центре Москвы, собственная чувствительность регистрирующей системы, состоящей только из СКВИД-магнитометра и подключенного имитатора гироскопа, составляла 0.5 фТл/Гц$^{1/2}$ в области белого шума, что говорит о высоком уровне экранирования датчика СКВИДа от воздействия внешних электромагнитных наводок и достаточной фильтрации электрических наводок на подводящих к СКВИДу и имитатору проводах (при достаточно простой экранировке, в отличие от использованной в [1]).

Электроника СКВИД-магнитометра была смонтирована в алюминиевом блоке размерами $157 \times 82 \times 17$ мм, располагалась в непосредственной близости от криостата и соединялась специальным кабелем длиной 70 см с криогенным зондом стенда. Схема СКВИД-электроники содержала аналоговую и цифровую части. Аналоговая часть использовала традиционную схему нуль-детектора и включала в себя цепь отрицательной

обратной связи по магнитному потоку, а также обеспечивала настройку рабочих параметров СКВИДа. Цифровая часть позволяла переключать режимы настройки и работы канала при управлении системой с персонального компьютера. СКВИД-электроника подключалась к блоку управления с помощью 5-метрового кабеля.

Однополюсный интегратор СКВИД-электроники формировал сигнал обратной связи, который подавался в катушку модуляции через резистор обратной связи [4]. Напряжение на резисторе обратной связи являлось выходным сигналом СКВИД-магнитометра. Электронная схема имела один фиксированный коэффициент обратной связи, равный 1 В/Φ_0. В режиме замкнутой цепи обратной связи при величине входного сигнала $0.1\Phi_0$ полоса пропускания СКВИД-электроники (по уровню −3 дБ) составляла около 10 кГц для данного значения коэффициента обратной связи.

Блок управления магнитометрической СКВИД-системы содержал стабилизированные источники питания и схемы управления, которые использовались для настройки и переключения режимов работы СКВИД-магнитометра. Управление режимами работы СКВИД-магнитометра осуществлялось с использованием персонального компьютера через USB-порт посредством кодов, генерируемых цифровыми схемами блока управления. Для этого было разработано соответствующее программное обеспечение. Для проведения экспериментальных исследований и анализа измеряемых сигналов с выхода СКВИД-магнитометра в состав измерительной установки были включены следующие контрольно-измерительные приборы: генератор звуковой частоты Stanford Research Systems, Model DS345; блок аналоговых фильтров Stanford Research Systems, Model SR650; осциллограф Textronix, Model TDS 1001; анализатор спектра Stanford Research Systems, Model SR785.

В режиме настройки рабочей точки на катушку модуляции СКВИД-магнитометра от генератора звуковой частоты подавался тестовый сигнал частотой 60–80 Гц и амплитудой 450–1250 мВ. Значения тока смещения и модуляции, соответствующие рабочей точке, устанавливались с использованием программного обеспечения, характеристики выходного сигнала СКВИДа отслеживались на осциллографе и регистрировались в персональном компьютере с помощью АЦП (24 бит), размещенными в блоке управления магнитометра. После настройки СКВИДа подача тестового сигнала прекращалась.

Регистрация низкочастотного дрейфа и шума выходного напряжения СКВИД-магнитометра в рабочей точке проводилась в течение различных промежутков времени с максимальной длительностью до 1 ч, частота опроса составляла 1 раз в 0.96 с.

В ряде экспериментов в качестве криостата был использован транспортный гелиевый дюар СТГ-25. Таким образом, исследования проводились в условиях очень простой экранировки СКВИД-магнитометра и проводов, задающих сигнал имитатора ротора (один или два свинцовых экрана без применения пермаллоевых экранов).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ И НИЗКОЧАСТОТНОГО ДРЕЙФА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СКВИД-МАГНИТОМЕТРА

2.1. Передаточная функция системы считывания на базе СКВИД-магнитометра

Результаты измерения передаточной функции представлены на рис. 2. Монотонность полученного графика позволяет говорить о возможности калибровки системы считывания и взаимно-однозначном соответствии между углом поворота сверхпроводящего гироскопа и изменением сигнала. Его отличие от косинусоидальной формы, соответствующей изменению потока через петлю при повороте однородного поля, объясняется тем, что Z-компонента магнитного поля от кругового тока через приемную петлю также не является пространственно-однородной.

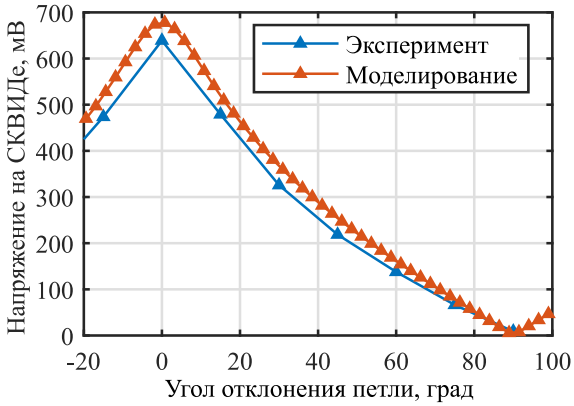

Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных зависимости напряжения на СКВИД-магнитометре от угла поворота сигнальной петли

Расчетная зависимость была получена методами компьютерного моделирования. Вычислялся магнитный поток в приемной петле, наведенный сигнальными петлями. Использовалась сетка 2000 × 2000, магнитное поле от элементарных отрезков сигнальной петли рассчитывалось по формуле Био—Савара—Лапласа. Происходило суммирование величины магнитного поля в каждой ячейке сетки от каждого элементарного отрезка, после чего полученное значение умножалось на площадь ячейки сетки. Суммарный магнитный поток для выбранного положения сигнальной петли пересчитывался исходя из измеренных индуктивностей петель и табличных коэффициентов их взаимной индуктивности. Выбор размера сетки обусловлен изучением поведения трансферной функции в различных геометриях, в том числе с плотно прилегающими сигнальной и приемной петлями.

2.2. Дрейф выходного напряжения СКВИДа гелиевого уровня охлаждения CE2blue

Было проведено несколько серий измерений дрейфа напряжения СКВИДа модели CE2blue гелиевого уровня охлаждения и электронных блоков СКВИД-магнитометра в отмеченном выше электромагнитном окружении. Результаты измерений представлены на рис. 3.

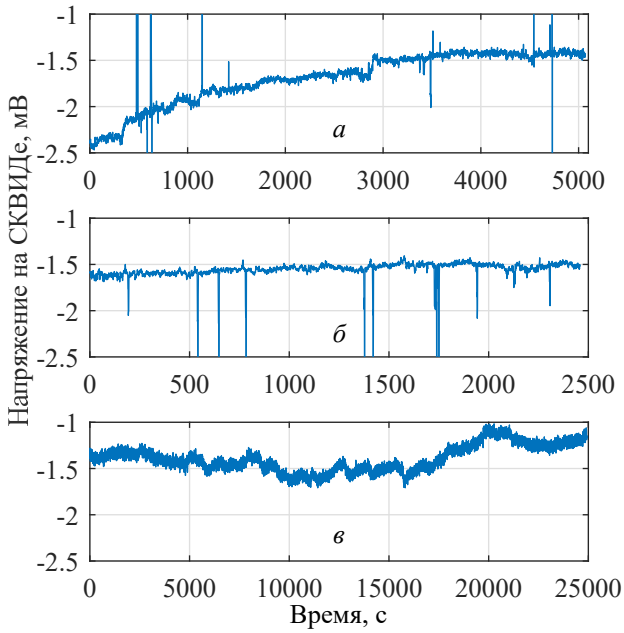

Рис. 3. Дрейф напряжения СКВИДа в измерениях *а*, *б* и *в*

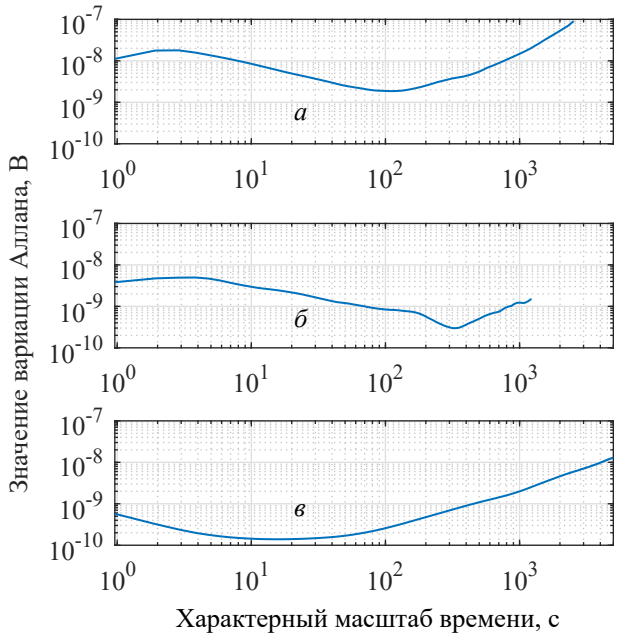

Рис. 4. Значение вариаций Аллана для результатов измерения напряжения выходного сигнала *а*, *б* и *в*

Шумовые характеристики системы на различных характерных временах были проанализированы с помощью вариации Аллана [5], расчет значения которой для выбранного значения характерного времени возможно произвести посредством интегрирования спектральной плотности шума во всей полосе частот с пропусканием через фильтр. Построение графика вариации позволяет анализировать особенности поведения системы на различных характерных временах.

В области малых времен вариация Аллана характеризует шум дискретизации, уменьшение которого влияет на дрейф напряжения при использовании, например, в системе с акселерометром [6], снижая накапливающуюся ошибку интегрирования.

Частичная компенсация шума такого рода возможна с помощью фильтра Калмана.Так как объектом изучения в данном исследовании является поведение напряжения СКВИД-магнитометра на больших характерных временах, а также планируемая система измеряет координату, а не ускорение или скорость объекта, то часть графика вариации Аллана, соответствующая малым характерным временам, нами не анализировалась.

Интересующий нас дрейф нуля напряжения может быть рассчитан из значения минимума графика вариации Аллана, поделенного на постоянный коэффициент 0.664 [5]. При оценке величины дрейфа имеет значение не только величина наименьшего значения на графике, но и ее расположение на временной шкале:линейное смещение нуля на малых характерных временах не будет являться дрейфом.

Графики вариации Аллана для проведенных измерений представлены на рис. 4. Исходя из анализа графиков наименьшие дрейфы нуля напряжения были зафиксированы в прописях (*а*) и (*б*) составили $1.9 \cdot 10^{-9}$ В/с (при характерном времени $t = 110.4$ с) и $3 \cdot 10^{-10}$ В/с (при $t = 326.4$ с) соответственно.

Выделить дрейф нуля напряжения в прописи (*в*) не удалось, так как он был зафиксирован при $t = 15.36$ с. Это свидетельствует о присутствии низкочастотной наводки (данное измерение проводилось в отличной от первых двух измерений электромагнитной обстановке).

С учетом измеренного нами ранее [7] значения передаточной функции, равной 6.5 мВ/град для данного стенда, возможен пересчет полученных значений в единицы град/ч. Тогда дрейф нуля напряжения данной модельной системы считывания, неотличимый от дрейфа самого гироскопа, можно оценить как $1.5 \cdot 10^{-3}$ град/ч и $2.5 \cdot 10^{-4}$ град/ч. В реальной инерциальной навигационной системе сигнал от сверхпроводящего гироскопа диаметром 29 мм будет гораздо больше. В первом приближении средняя по площади приемной петли величина поля от двухвитковой тестовой катушки может быть оценена как поле в центре двух витков с током:

$$B_{\text{тест}} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{I_{\text{тест}}}{2 \cdot R_{\text{витка}}} = 54 \text{ пТл}.$$

При этом поле от реального гироскопа, вращающегося с частотой 800 Гц, оценивается [3] по формуле

$$\mathbf{B} = \frac{-2mc}{e}\boldsymbol{\omega}$$

и дает значение 34.2 нТл. Таким образом, трансферная функция возрастет примерно 600 раз и оценка дрейфа напряжения для реальной системы дает значение $2.5 \cdot 10^{-6}$ град/ч и $4.1 \cdot 10^{-7}$ град/ч.

Линейный дрейф нуля напряжения системы считывания может быть измерен представленным методом в ходе предварительной настройки инерциальной навигационной системы перед использованием и скомпенсирован математически во время ее использования.

3. МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛА ИНС

Уменьшить влияние дрейфа нуля напряжения на отношение сигнал/шум в выходном сигнале можно и другим способом: промодулировав сигнал, перенеся его тем самым из области с сильным влиянием $1/f$ шумов в область преобладания белого шума. Для оценки возможного выигрыша в отношении сигнал/шум были выполнены измерения со СКВИДом на основе высокотемпературных сверхпроводников. Результаты измерений представлены в этом разделе. В этом эксперименте на вход СКВИДа подавался сигнал миллигерцового диапазона частот, модулированный на частоте 24 Гц, лежащей выше частоты среза шума $1/f$.

В реальной ситуации модуляцию сигнала возможно реализовать двумя способами: механическим движением корпуса ИНС относительно сверхпроводящего гироскопа или добавлением модуляционной схемы в систему считывания, например периодически размыкая цепь трансформатора магнитного потока между СКВИДом и приемной петлей. Первый подход был реализован в эксперименте GPB на орбите Земли: спутник вращался вокруг своей оси, а сверхпроводящий гироскоп находился в инерциальной системе отсчета. Второй способ можно реализовать периодическим разрывом цепи трансформатора потока, который даст модуляцию меандром. Однако такой способ значительно искажает спектр выходного сигнала (рис. 5), примешивая богатый гармониками спектр меандра. В результате в выходном сигнале присутствует множество пиков сравнимой амплитуды в районе частоты модуляции, что затрудняет автоматический расчет частоты и амплитуды исходного сигнала, а также ухудшает отношение сигнал/шум (на побочные пики распределяется часть энергии).

При синусоидальной модуляции спектр выходного сигнала не искажается и отношение сигнал/шум

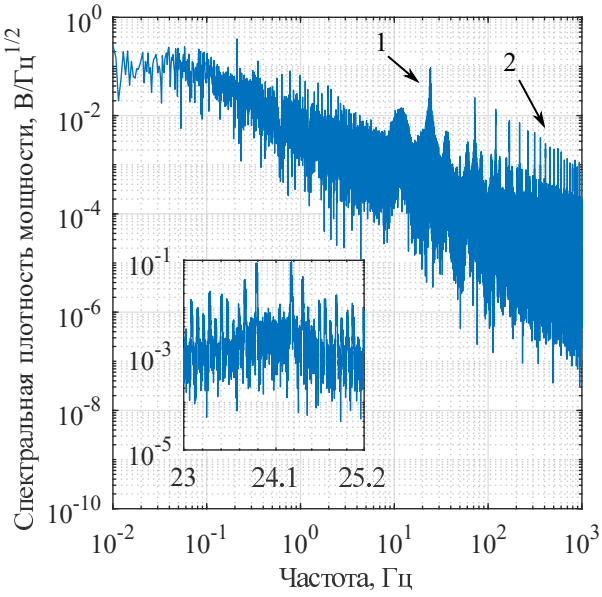

Рис. 5. Спектр сигнала, модулированного меандром: *1* — сигнал, перенесенный в область частоты модуляции (увеличенное изображение области во врезке), *2* — побочные пики от перенесенного сигнала

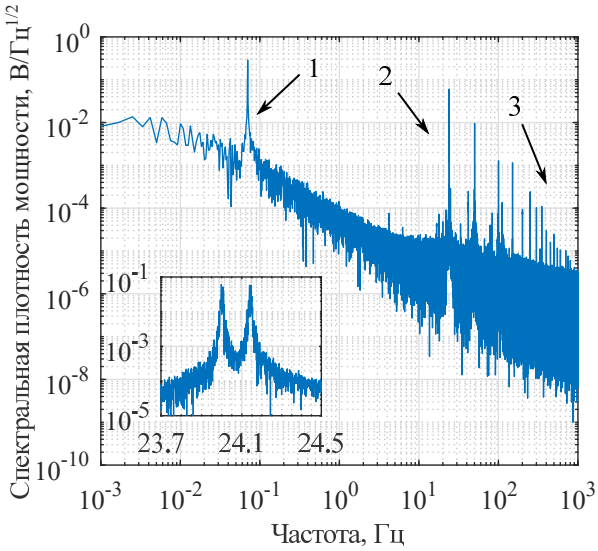

Рис. 6. Спектр сигнала, модулированного синусоидальным сигналом: *1* — пик оригинального сигнала, *2* — сигнал, перенесенный в область частоты модуляции (увеличенное изображение области во врезке), *3* — побочные пики от перенесенного сигнала

составило 26 в области $1/f$ шумов на частоте исходного сигнала 70 мГц и 13000 на частоте модуляции 24 Гц (рис. 6). На практике корпус ИНС наземного базирования не представляется возможным вращать с постоянной частотой вокруг сверхпроводящего гироскопа, однако возможна реализация механизма качания ИНС с постоянной частотой внутри транспорта. Такой способ модуляции будет достаточно близок по форме к синусоидальному, а потому можно ожидать лишь небольшого искажения спектра выходного сигнала. Вопрос реализации и подбора характеристик модуляции представляет интерес в контексте инерциальных навигационных систем и станет логичным продолжением данного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики системы считывания на основе СКВИД-магнитометрадля ИНС, использующей сверхпроводящий гироскоп. Рассчитана и измерена функция преобразования угла поворота оси гироскопа в напряжение на выходе магнитометра. Найденные с помощью вариации Аллана шумовые характеристики СКВИД-магнитометра на временных интервалах до восьми часов позволили оценить дрейф нуля напряжения системы считывания на уровне 10^{-6} град/ч. Этот результат превосходит характеристики современных ИНС на классических гироскопах, что позволяет создать систему считывания для ИНС на основе сверхпроводящего гироскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке АО ЦНИИ «Электроприбор».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Everitt C. W. F.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. **106**. 221101.
2. *Peshekhonov V. G.* // Gyroscopy Navig. 2011. **2**. P. 111.
3. *London F.* // Superfluids. Dover, 1964. P. 83.

4. *Fagaly R.* // Rev. of Scient. Instr. 2006. **77**. 101101.
5. IEEE Standards Board // IEEE Std. 952-1997, annex C, P. 62. 1998. 11.
6. *Diao Z.* et al. // 2013 7th ICST. IEEE. 2013. P. 592.
7. *Panov V. I.* et al. // 2017 16th ISEC. IEEE. 2017. P. 1.

A SQUID Magnetometer-Based Readout System for an Inertial Navigation System

A. V. Rzhevskiy[1,2,a], **O. V. Snigirev**[1,3,4], **Yu. V. Maslennikov**[5], **V. Yu. Slobodchikov**[6]

[1]*Department of Physics of Semiconductors and Cryoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*
[2]*Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia.*
[3]*Lomonosov Moscow State University Quantum Technology Centre. Moscow 119991, Russia.*
[4]*NRC «Kurchatov Institute». Moscow 123182, Russia.*
[5]*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (IZMIRAN). Moscow 108840, Russia.*
[6]*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS. Moscow 125009, Russia.*
E-mail: [a]*rzhevskiy.aleksandr@physics.msu.ru.*

The characteristics of a SQUID magnetometer-based readout system for a superconducting gyroscope-based inertial navigation system (INS) are investigated. The transformation function of the rotation angle of the gyroscope simulator to the voltage at the magnetometer output with a value close to 6.5 mV/deg is calculated and measured. This value corresponds to 4.1 V/deg for a superconducting gyroscope with a rotor diameter of 30 mm. Zero voltage drifts with a duration of up to 8 h are measured on the SQUID magnetometer. A drift of 10^{-6} deg/h was detected.

Keywords: SQUID, superconductivity, inertial navigation systems.
PACS: 85.25.Dq.
Received 16 March 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 4. Pp. 336–341.

Сведения об авторах

1. Ржевский Александр Владимирович — инженер I кат.; тел.: (495) 939-33-43, e-mail: rzhevskiy.aleksandr@physics.msu.ru.
2. Снигирев Олег Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-59-34.
3. Масленников Юрий Васильевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник.
4. Слободчиков Владимир Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник.