УДК 621.378
DOI 10.17285/0869-7035.0020

Г. В. БЕЗМЕН, А. Н. ШЕВЧЕНКО, П. Н. КОСТИН, А. Н. БЕРЗЕЙТИС,
В. С. БЕЗМЕН, В. И. ПЕТРОВ

СИСТЕМА ДВУХЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СХЕМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Рассматриваются особенности реализации цепи обратной связи в квантовом датчике угловой скорости, построенном на двухчастотном спиновом генераторе на изотопах ксенона. Перечислены технические решения, обеспечивающие устойчивую двухчастотную генерацию, такие как блоки автоматической регулировки усиления и фазовые фильтры. Приведены результаты экспериментальных исследований режимов генерации на макете квантового датчика угловой скорости в условиях неподвижного и вращающегося основания.

Ключевые слова: квантовый сенсор, спиновый генератор, обратная связь, ядерный магнитный резонанс.

Введение

Квантовые сенсоры – измерительные приборы, основанные на квантовых эффектах, – привлекают внимание исследователей и индустрии благодаря высокому пространственному и временному разрешению. Современные квантовые технологии, обеспечивающие высокую степень контроля состояния микроскопических систем, позволяют разрабатывать квантовые сенсоры с высокой чувствительностью.

Одним из перспективных путей построения квантовых сенсоров является использование спиновых генераторов, основанных на спин-обменной накачке изотопов инертных газов и оптическом детектировании их состояния. В настоящее время такой подход используется в сверхкомпактных магнитометрах [1–3], гироскопах на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [4–7] и низкочастотных мазерах [8, 9].

В данной работе рассматривается спиновый генератор (далее – генератор), основанный на эффекте ЯМР в изотопах ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe, накачка которых производится через спин-обменное взаимодействие с оптически ориентированными атомами щелочного металла ^{133}Cs. Принцип работы подобных генераторов описан в статьях как российских, так и зарубежных ученых [10–12]. Точность и стабильность генераторов во многом определяется цепью обратной связи, поэтому изучение методов ее реализации является актуальной задачей для многих исследовательских групп [13–15].

Безмен Глеб Владимирович. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).
Берзейтис Александр Николаевич. Инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
Костин Павел Николаевич. Инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
Шевченко Александр Николаевич. Заместитель начальника лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
Безмен Владимир Сергеевич. Кандидат технических наук, главный специалист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
Петров Владимир Игоревич. Научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

В работе приводится вариант конструкции генератора и обосновывается выбранный подход к системе генерации прецессии спинов изотопов. Особенности реализации двухчастотной генерации с использованием полосовых фильтров в цепи обратной связи заключаются в необходимости предварительной настройки фазы самогенерации изотопов ксенона и реализации механизма автоматической регулировки усиления. В работе приведены результаты технической реализации спинового генератора на макете квантового датчика угловой скорости и исследований режимов его работы на неподвижном и вращающемся основании.

Конструкция и структура спинового генератора

Спиновый генератор состоит из чувствительного элемента и блока электроники.

Конструкция чувствительного элемента спинового генератора представлена на рис. 1. Ее особенность заключается в том, что она состоит из двух частей:

- камеры магнитного экрана;
- кронштейна с модулями электроники.

В камере магнитного экрана расположены:

- магнитный экран с нагревательным элементом [16];
- система соленоидов, задающая поля B_0, B_{AC} и B_{1Xe} [17];
- ячейка с парами щелочного металла и изотопами ксенона и немагнитный нагревательный элемент [18, 19];
- элементы оптической системы (зеркала и линзы), обеспечивающие формирование и пропускание через ячейку излучения накачки и детектирования [20].

В кронштейне с модулями электроники установлены:

- лазерные излучатели, формирующие излучения накачки и детектирования [21];
- платы электроники с фотоприемниками для детектирования и контроля излучений накачки и детектирования и цепями предварительного усиления сигнала;
- элементы оптической системы (поляризационные кубы и пластины), обеспечивающие формирование циркулярно- и линейно-поляризованного излучения;
- металлический кронштейн с нагревательным элементом, обеспечивающий установку и позиционирование относительно друг друга оптических элементов и лазерных излучателей и плат фотоприемников с требуемой точностью;
- плата электроники с драйверами управления лазерными излучателями, разъемами и линиями связи для передачи на блок электроники сигналов от фотоприемников и получения от блока электроники управляющих сигналов для соленоидов, нагревательных элементов и лазерных излучателей.

Разделение конструкции генератора на две составные части обусловлено разными требованиями к температуре окружающей среды для газовой ячейки и лазерных излучателей системы оптической накачки и детектирования. Для газовой ячейки она должна быть 80°С, для лазерных излучателей – не более 40°С. Для обеспечения температуры в каждой зоне используется двухконтурная система термостабилизации.

Блок электроники спинового генератора имеет модульную структуру и состоит из блоков, отвечающих за выполнение следующих задач:

- управление системами термостабилизации генератора;
- формирование требуемых для работы блоков различных видов электропитания (питающих напряжений) с обязательной развязкой от внешних источников питания;

- формирование сигналов различных опорных частот;
- обработка сигналов от фотоприемников и выработка управляющих сигналов для лазерных излучателей и соленоидов.

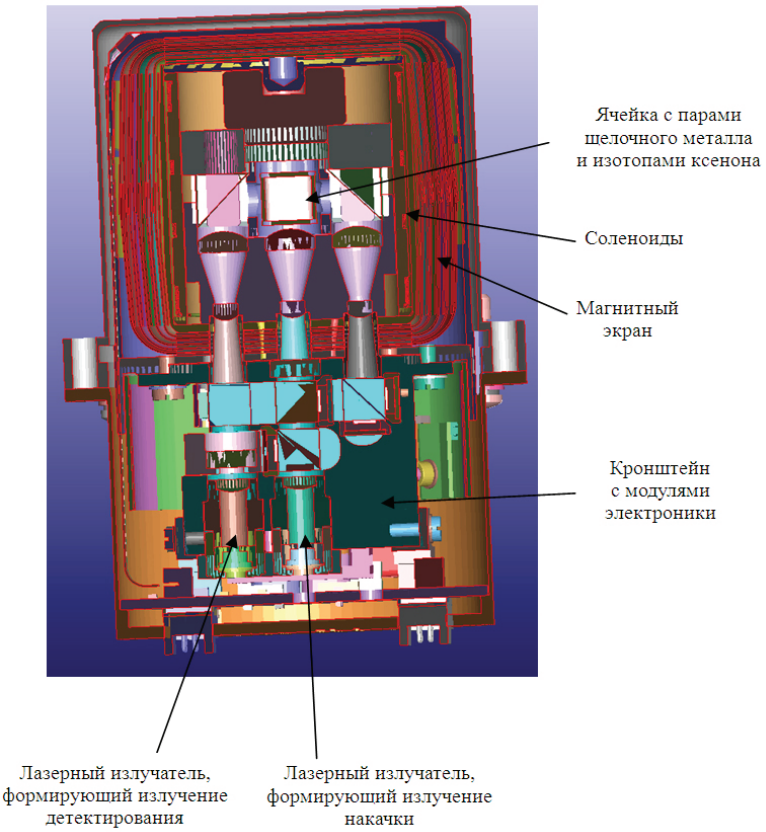

Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента

Структура квантового сенсора, построенного по принципу спинового генератора

Принцип работы генератора, использующего эффекты ЯМР в изотопах ксенона и электронного парамагнитного резонанса в атомах цезия, поясняется схемой на рис. 2. В рассматриваемом варианте генератора электронные спины цезия ориентируются циркулярно-поляризованным резонансным излучением накачки и передают свою поляризацию ядрам ксенона через спин-обменное взаимодействие, при этом формируется макроскопический вектор намагниченности **M**. Частота прецессии вектора **M** (вектора намагниченности ядерных спинов ксенона) определяется напряженностью постоянного магнитного поля $\mathbf{B}_0$ и величиной гиромагнитного отношения соответствующего изотопа. Детектирование скорости прецессии вектора **M** производится оптическим магнитометром на цезии, для реализации которого электронный парамагнитный резонанс в цезии возбуждается сильным продольным резонансным полем B_{AC}. При этом поперечная составляющая вектора **M** преобразуется в амплитудную модуляцию быстро прецессирующей поперечной компоненты намагниченности цезия.

Детектирование поперечной намагниченности цезия производится по повороту поляризации линейно-поляризованного лазерного излучения детектирования, частота которого отстроена от оптического резонанса цезия на оптимальную величину, имеющую порядок ширины атомной оптической линии поглощения. Поворот плоскости поляризации детектируется с использованием балансной схемы из двух фотоприемников и поляризационного светоделительного куба.

Из сигнала от фотоприемников выделяются два сигнала с частотами, соответствующими прецессии двух изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe. Эти сигналы используются для формирования резонансного переменного вынуждающего магнитного поля B_{1Xe}, которое задает фазы макроскопической прецессии ядерных спинов изотопов ксенона. Разность фаз сигналов на частоте прецессии одного из изотопов ксенона и стабильного по частоте и фазе соответствующего опорного сигнала несет информацию о повороте генератора вокруг оси *Z*.

На рис. 2 отражена также структура системы двухчастотной генерации. На вход системы подаются сигналы от двух фотоприемников, настроенных на прием двух ортогональных составляющих линейно-поляризованного излучения канала детектирования, прошедшего через газовую ячейку [22–24]. Разностный сигнал двух фотодиодов подается на входы двух синхронных детекторов СД-Д1 и СД-Д2 с опорными гармоническими сигналами на частоте резонансного поля ^{133}Cs B_{AC} [12], имеющими сдвиг фаз сигнала относительно друг друга 90°. На выходах синхронных детекторов выделяются суммарные сигналы прецессий изотопов ксенона (в ортогональных поперечных осях чувствительного элемента *X* и *Y*), из которых (после аналого-цифрового преобразования) с помощью цифровых полосовых фильтров ФПЧ-Д1, ФПЧ-Д2, ФПЧ-Д3, ФПЧ-Д4 выделяются непосредственно сигналы прецессий изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe в осях *X* и *Y*. Выделенные сигналы прецессий по оси *Y* подаются на вход буферов СБ1 и СБ2, на выходах которых выходные сигналы сдвинуты относительно входных на определенное значение тактов микроконтроллера, что реализует сдвиг фазы сигнала на нужное значение, но с большим шагом. Для более точной подстройки сдвига фазы используются фазовые фильтры ФФ1 и ФФ2. Полученные на выходах фазовых фильтров сигналы усиливаются до требуемого значения в блоках автоматического регулирования усиления АРУ1 и АРУ2, суммируются друг с другом и подаются на соленоид X для формирования поля B_{1Xe} [12]. В результате мы получаем систему, которую можно представить в виде двух автогенераторных систем, которые вырабатывают гармонические сигналы, поддерживающиеся путем подачи по цепи положительной обратной связи части вырабатываемого сигнала, с выхода генератора на его вход. При этом отличие систем заключается в следующем:

- первая автогенераторная система – это система, работа которой основана на макроскопической прецессии ядерных спинов изотопов ксенона ^{129}Xe, соответственно, она генерирует сигнал на частоте, близкой к частоте свободной прецессии ^{129}Xe;
- вторая автогенераторная система построена аналогичным образом и генерирует сигнал на частоте, близкой к частоте свободной прецессии ^{131}Xe.

Представленные в данной статье автогенераторные системы работают в мягком режиме, характеризующемся безусловным быстрым установлением стационарного режима при включении. В этом режиме осуществляется плавное изменение коэффициентов усиления по цепям обратной связи, в жестком – скачкообразно [25, 26].

Реализация жесткого режима нецелесообразна, так как требует дополнительных условий для установления колебаний большой величины коэффициента обратной связи либо дополнительного внешнего воздействия.

Реализация двухчастотной системы генерации обусловлена тем, что у изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe гиромагнитные отношения имеют противоположные знаки, что позволяет в дальнейшем создать балансную схему, которая будет подавлять влияние остаточных флуктуаций постоянного магнитного поля $\mathbf{B}_0$.

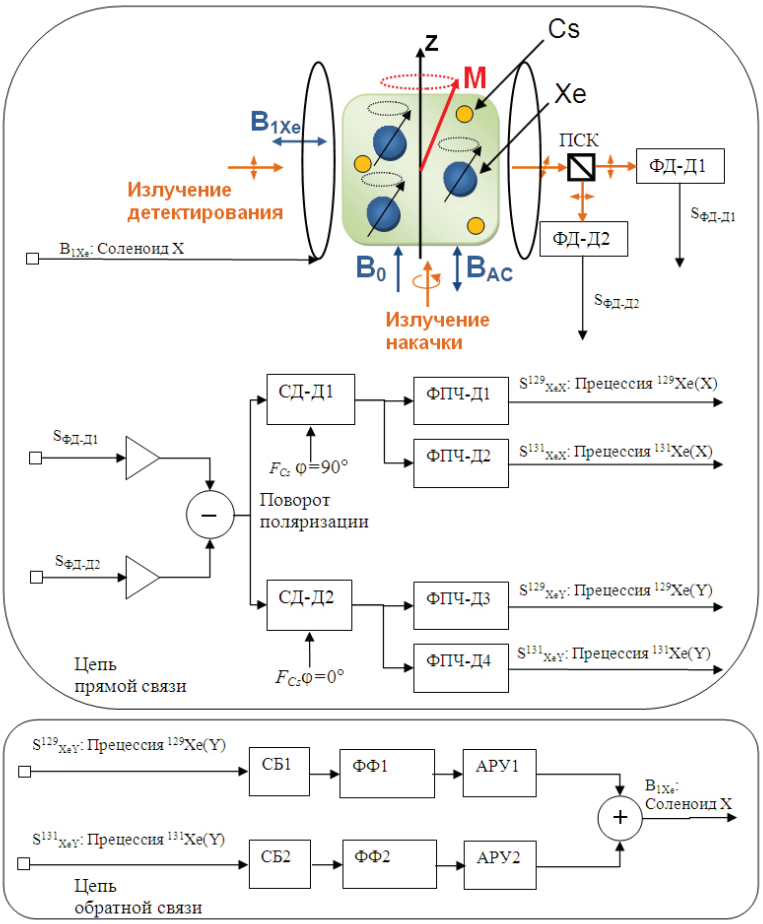

Рис. 2. Схема системы двухчастотной генерации.

Xe – изотопы ксенона; Cs – пары цезия; B_0 – постоянное магнитное поле, вдоль которого направлена ось *Z*; B_{AC} – продольное переменное поле на частоте прецессии атомов цезия; **M** – макроскопический магнитный момент ансамбля атомов ксенона; B_{1Xe} – вынуждающее магнитное поле, создаваемое соленоидом X, на частоте прецессии магнитного момента **M**; ПСК – поляризационный светоделительный куб; ФД – фотодиоды; СД – синхронные детекторы; ФПЧ – полосовые фильтры; СБ – кольцевые сдвиговые буферы; ФФ – фазовые фильтры; АРУ – блоки автоматического регулирования усиления

Описание элементов системы двухчастотной генерации

Схема вычитания сигналов $S_{ФД\text{-}Д1}$ и $S_{ФД\text{-}Д2}$, снимаемых с фотоприемников канала детектирования, служит для уменьшения уровня шумов при определении угла

поворота линейно-поляризованного детектирующего излучения, прошедшего через газовую ячейку. Это основано на том, что дисперсию шумов сигналов фотодиодов можно представить в следующем виде:

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2,$$

где σ_1 – величина, характеризующая дробовый шум фототока в полосе 1 Гц;
σ_2 – величина, характеризующая шум интенсивности излучения канала детектирования на частоте резонансного поля ^{133}Cs;
σ_3 – величина, характеризующая дополнительный шум интенсивности, возникающий вследствие преобразования частотных шумов.

Использование балансной схемы, осуществляющей вычитание сигналов от двух фотоприемников, позволяет на несколько порядков подавить шумы с составляющими σ_2, σ_3.

Синхронные детекторы СД-Д1, СД-Д2 служат для выделения суммарных сигналов прецессий изотопов ксенона. Для качественной работы генератора на выходах синхронных детекторов СД-Д1, СД-Д2 должно быть обеспечено соотношение «сигнал–шум» на уровне не менее 125 дБ, что делает невозможным реализацию этих синхронных детекторов в цифровом виде ввиду необходимости выполнения преобразования на высокой частоте дискретизации: согласно теореме Котельникова – на удвоенной частоте прецессии цезия (порядка 70кГц). В связи с этим синхронные детекторы СД-Д1, СД-Д2 были реализованы в схеме на основе операционных усилителей в аналоговом виде. Их выходной сигнал оцифровывается и подается на блоки ФПЧ-Д1, ФПЧ-Д2, ФПЧ-Д3, ФПЧ-Д4, СБ1, СБ2, ФФ1, ФФ2, АРУ1, АРУ2, которые реализованы в цифровом виде с использованием микроконтроллера.

Полосовые фильтры ФПЧ-Д1, ФПЧ-Д2, ФПЧ-Д3 и ФПЧ-Д4 представляют собой фильтры Баттерворта второго порядка. Данный тип фильтров был выбран, поскольку их амплитудно-частотная характеристика – максимально гладкая на частотах полосы пропускания и снижается практически до нуля на частотах подавления, что не приводит к искажению гармонического сигнала, выделяемого этими фильтрами. Частоты среза данных фильтров выбраны равными ±5Гц относительно частоты резонансного поля изотопа ксенона, обеспечивая достаточно гладкую ФЧХ фильтров, при которой вносимое ими изменение сдвига фазы детектируемого сигнала принимает достаточно малое значение. Выбор порядка фильтров равного двум обусловлен тем, что использование фильтров более высоких порядков может привести к ложным генерациям сигналов на частотах, находящихся на их границах.

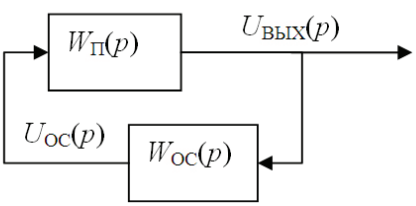

Рис. 3. Схема автогенераторной системы.
$U_{ОС}$(p) – сигнал цепи обратной связи, являющийся входным сигналом для системы; $U_{ВЫХ}$(p) – выходной сигнал; $W_П$(p) – передаточная функция цепи прямой связи; $W_{ОС}$(p) – передаточная функция цепи обратной связи

Как отмечалось выше, систему двухчастотной генерации можно представить в виде двух автогенераторных систем, состоящих из цепей прямой и обратной связи. Каждую из таких систем можно представить в следующем виде (см. рис. 3) [27, 28].

Данная система находится в стационарном режиме работы, т.е. все переходные процессы завершены и автогенератор генерирует колебания с частотой $\omega_Г$, которая определяется резонансной частотой изотопов ксенона. Выходной сигнал автогенератора описывается выражением

$$U_{вых}(p)=W_П(p)U_{ОС}(p)=W_П(p)W_{ОС}(p)U_{вых}(p). \quad (1)$$

Сокращая обе части равенства (1) на $U_{вых}(p)$ и произведя замену $p=j\omega_Г$, получим

$$K_П\left(\omega_Г\right)K_{ОС}\left(\omega_Г\right)e^{j\left[\phi_П(\omega_Г)+\phi_{ОС}(\omega_Г)\right]}=1, \quad (2)$$

где $K_П(\omega_Г)$ и $K_{ОС}(\omega_Г)$ – коэффициенты усиления (передачи) цепей прямой и обратной связи на частоте $\omega_Г$, а $\varphi_П(\omega_Г)$ и $\varphi_{ОС}(\omega_Г)$ – соответствующие фазовые сдвиги.

Условие (2) выполняется при балансе амплитуд и балансе фаз:

$$K_П\left(\omega_Г\right)K_{ОС}\left(\omega_Г\right)=1,$$
$$\phi_П\left(\omega_Г\right)+\phi_{ОС}\left(\omega_Г\right)=2\pi l,$$

где $l = 0, \pm1, \pm2,...$

Условие баланса амплитуд означает, что в стационарном режиме работы автогенератора на генерируемой частоте $\omega_Г$ полное усиление при обходе кольца обратной связи должно составлять единицу, а условие баланса фаз – что полный фазовый сдвиг при обходе кольца обратной связи должен быть равен 0 или кратен 2π. Для обеспечения условия баланса фаз служат блоки СБ1, СБ2, ФФ1, ФФ2. Блоки СБ1 и СБ2 представляют собой кольцевые буферы, реализованные в программном виде и имеющие размер 200 элементов каждый. В блоки последовательно записываются значения сигналов генерации изотопов ксенона, а на выходе подаются сигналы, записанные на определенное количество тактов ранее, что позволяет обеспечить требуемое условие баланса фаз в грубом виде ($\pm15^o$). Для более точной настройки используются фазовые фильтры ФФ1 и ФФ2 с передаточной функцией $W(p)=\frac{-T_{ФФ}p+1}{T_{ФФ}p+1}$. Варьирование параметра $T_{ФФ}$ позволяет более точно устанавливать требуемое значение сдвига фазы. Алгоритм настройки блоков СБ1, СБ2, ФФ1, ФФ2 следующий:

- производится подборка требуемого количества тактов сдвига блоков СБ1, СБ2 (обязательно наличие работы блоков АРУ1, АРУ2). Критерием правильного выбора является экспоненциальное затухание сигналов изотопов ксенона при размыкании обратной связи, как показано на рис. 5 (для изотопа ксенона ^{129}Xe) и рис. 6 (для изотопа ксенона ^{131}Xe). При неправильном выборе фазы не будет наблюдаться экспоненциального затухания сигналов, соответствующего релаксации макроскопического магнитного момента изотопов ксенона, как показано на рис. 7;
- производится подборка параметра $T_{ФФ}$ в блоках ФФ1 и ФФ2. Критерием качества настройки является наиболее длительное время затухания сигналов изотопов ксенона, минимальное соотношение «сигнал–шум» в сигналах генерации ксенона и минимальный коэффициент усиления, сформированный в блоках АРУ1 и АРУ2.

На рис. 4–6 представлены графики сигналов генерации изотопов ксенонов в поперечных осях чувствительного элемента.

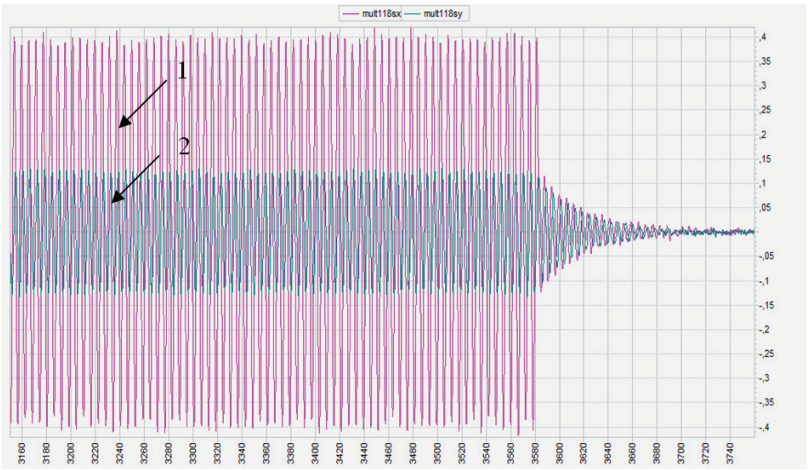

Рис. 4. Графики сигналов генерации ^{129}Xe в поперечных осях чувствительного элемента (прецессия ^{129}Xe (X) – график 1 и прецессия ^{129}Xe (Y) – график 2), обработанных с помощью синхронных детекторов с опорной частотой, равной частоте резонансного поля изотопа ксенона ^{129}Xe (10 отсчетов по оси абсцисс равны 1 с). Размыкание обратной связи происходит на отсчете 3580

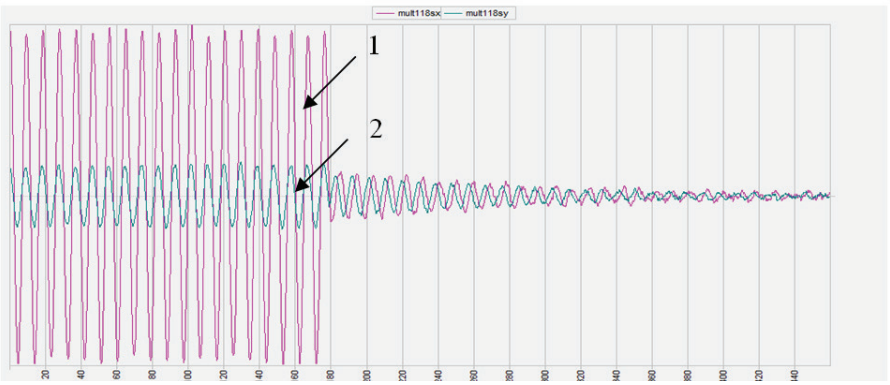

Рис. 5. Графики сигналов генерации ^{131}Xe в поперечных осях чувствительного элемента (прецессия ^{131}Xe (X) – график 1 и прецессия ^{131}Xe (Y) – график 2), обработанных с помощью синхронных детекторов с опорной частотой, равной частоте резонансного поля изотопа ксенона ^{131}Xe (10 отсчетов по оси абсцисс равны 1 с). Размыкание обратной связи происходит на отсчете 180

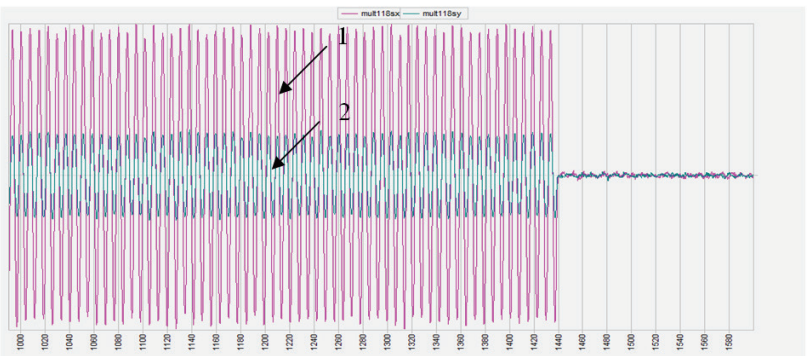

Рис. 6. Графики сигналов генерации ^{131}Xe в поперечных осях чувствительного элемента с неправильно выбранной фазой (прецессия ^{131}Xe (X) – график 1 и прецессия ^{131}Xe (Y) – график 2), обработанных с помощью синхронных детекторов с опорной частотой, равной частоте резонансного поля изотопа ксенона ^{131}Xe (10 отсчетов по оси абсцисс равны 1 с). Размыкание обратной связи происходит на отсчете 1440

Для обеспечения баланса амплитуд служат блоки АРУ1 и АРУ2, представляющие собой блоки автоматической регулировки усиления (АРУ). Алгоритм работы блоков реализован в виде прямого АРУ [29–31] (регулирование усилителя осуществляется на основе подаваемого на усилитель сигнала) и представлен на рис. 7. Фильтр АРУ реализован в виде звена с передаточной функцией $W(p)=\frac{1}{T_{АРУ}p}$. Алгоритм настройки АРУ заключается в выборе такого уровня регулируемого сигнала и такого параметра $T_{АРУ}$, чтобы получить устойчивую генерацию сигнала изотопа ксенона. Особое внимание требуется обратить на уровень генерируемого сигнала, поскольку при большом уровне будет происходить детектирование не только сигнала макроскопического магнитного момента ансамбля атомов ксенона, но и собственного генерируемого вынуждающего магнитного поля на частоте прецессии магнитного момента. Критерием правильного выбора является также наличие эффекта релаксации сигналов изотопов ксенона при размыкании обратной связи.

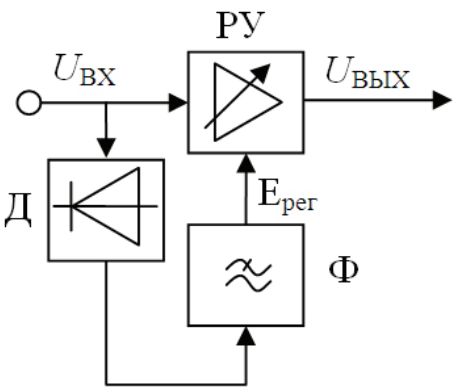

Рис. 7. Схема автоматической регулировки усиления (АРУ): $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ – входной и выходной сигналы соответственно; РУ – регулируемый усилитель; Д – детектор АРУ; Ф – фильтр АРУ; $E_{рег}$ – сигнал регулировки, получаемый в результате детектирования входного сигнала

Работа системы генерации на неподвижном и вращающемся основании

На рис. 4 и 5 видно, что после размыкания цепи обратной связи происходит спад амплитуды сигнала прецессии по экспоненциальному закону с постоянной времени, характерной для времени жизни изотопов ксенона. На рис. 6 представлены графики сигналов генерации изотопов ксенона с неправильно выбранной фазой генерации. Наличие эффекта спада амплитуды сигнала прецессии по экспоненциальному закону является обязательным, но недостаточным критерием существования спиновой генерации. При неправильной настройке фазы в петле обратной связи может возникать устойчивая самогенерация на частотах, определяемых границами полосовых фильтров, а не прецессией спинов ксенона. Если возникла нежелательная генерация на частоте среза фильтра, которая отличается от ларморовской частоты прецессии менее чем на 0,1 Гц, то при размыкании цепи обратной связи будет наблюдаться экспоненциальное затухание сигналов. Это затухание обусловлено релаксацией макроскопического магнитного момента изотопов ксенона, который до размыкания совершал прецессию на частоте среза фильтра, а после размыкания – на ларморовской частоте. Для подтверждения возникновения спиновой генерации на ларморовской частоте требуется проверка работы данной системы на вращающемся основании, где она выступает в качестве датчика угловой скорости, поскольку работа в таком режиме вызовет смещение генерируемых частот на величину, равную угловой скорости вращения основания. Работа системы генерации на вращающемся основании представлена на рис. 8 (сигнал генерации изотопа ксенона ^{129}Xe при вращении основания с угловыми скоростями от –90°/с до 90°/с) и рис. 9 (сигнал генерации изотопа ксенона ^{131}Xe при вращении основания с угловыми скоростями от 50°/с до –50°/с).

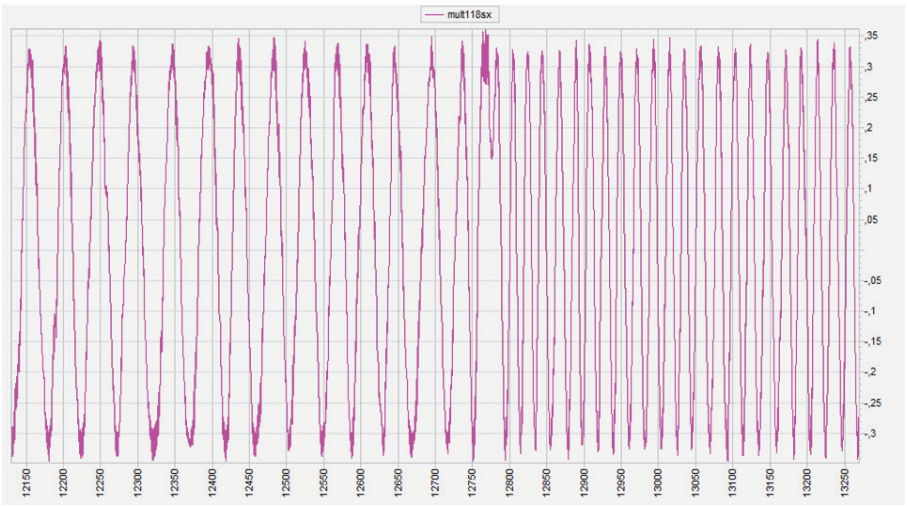

Рис. 8. График сигнала генерации ^{129}Xe в поперечной оси чувствительного элемента, обработанный с помощью синхронного детектора с опорной частотой, равной частоте резонансного поля изотопа ксенона ^{129}Xe, при вращении с угловыми скоростями от –90°/с до 90°/с (10 отсчетов по оси абсцисс равны 1 с)

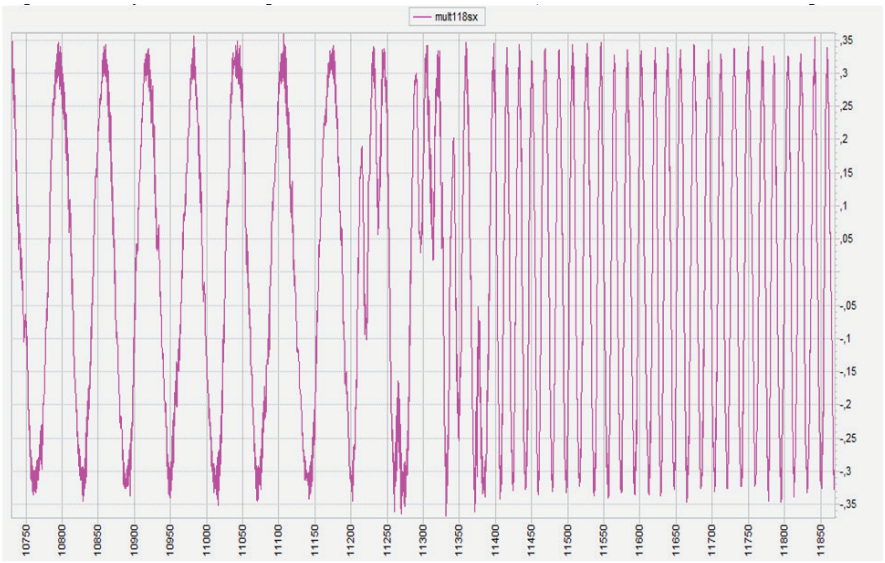

Рис. 9. График сигнала генерации ^{131}Xe в поперечной оси чувствительного элемента, обработанный с помощью синхронного детектора с опорной частотой, равной частоте резонансного поля изотопа ксенона ^{131}Xe, при вращении с угловыми скоростями от 50°/с до –50°/с (10 отсчетов по оси абсцисс равны 1 с)

Заключение

В статье представлена структура и конструкция двухчастотного спинового генератора с описанием его основных элементов и узлов. Подробно рассмотрена реализация цепи обратной связи, обеспечивающей устойчивую двухчастотную генерацию. Приведены экспериментальные результаты, полученные на макете спинового генератора на неподвижном и вращающемся основании, которые подтвердили правильность принятых при его разработке технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Budker, D., Romalis, M.,** Optical magnetometry, *Nature Phys.*, 2007, vol. 3, pp. 227. DOI: 10.1038/nphys566.
2. **Александров Е.Б., Вершовский А.К.** Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 605–637.
3. **Zhivun, E., et al.,** Dual-axis pi-pulse spin-exchange relaxation-free magnetometer, *arXiv preprint arXiv*:1805.12286, 2018.
4. **Larsen, M., Bulatowicz, M.,** Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program, *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symposium*, 2012.
5. **Feng, D.,** Review of quantum navigation, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 237, p. 032027.
6. **Вершовский А.К., Шевченко А.Н.** Ядерный магнитный гироскоп: принцип действия, история, перспективы // Навигация и управление движением. Материалы XVII конференции молодых ученых. 2015. С. 19–28.
7. **Liu, Y., Shi, M., Wang, X.,** Progress on atomic gyroscope, *24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, IEEE, 2017, pp. 1–7.
8. **Yoshimi, A., et al.,** Development of NMOR magnetometer for spin-maser EDM experiment, *Physics Procedia*, 2011, vol. 17, pp. 245–250.
9. **Rosenberry, M.A. and Chupp, T.E.,** Atomic electric dipole moment measurement using spin exchange pumped masers of 129Xe and 3He, *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86, 22–25.
10. **Walker, T.G., Larsen, M.S.,** Spin-exchange-pumped NMR gyros, *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2016, vol. 65, pp. 377–405.
11. **Wang, S.G., et al.,** Progress on Novel Atomic Magnetometer and Gyroscope Based on Self-sustaining of Electron Spins, *China Satellite Navigation Conference*, Springer, Singapore, 2017, pp. 535–542.
12. **Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №.1. С. 55–80.
13. **Jiang, M., et al.,** Floquet-state Maser under Real-time Quantum Feedback Control, *arXiv preprint arXiv*:1901.00970, 2019.
14. **Sato, T., et al.,** Development of co-located 129Xe and 131Xe nuclear spin masers with external feedback scheme, *Physics Letters A.*, 2018, vol. 382, no.8, pp. 588–594.
15. **Inoue, T., et al.,** Frequency characteristics of nuclear spin oscillator with an artificial feedback toward search for 129 Xe atomic electric dipole moment, *The European Physical Journal D.*, 2016, vol. 70, no. 6, p. 129.
16. **Кулаченков Н.К., Шевченко А.Н., Безмен Г.В.** Исследование магнитных экранов с использованием современных методов проектирования // Навигация и управление движением. Материалы XVIII конференции молодых ученых с международным участием. 2016. С. 678–682.
17. **Шевченко А.Н., Захарова Е.А.** Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО. XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. СПб., 2018. С. 176–179.
18. **Шевченко А.Н., Кузьмин А.Г., Титов Ю.А.** Масс-спектрометрическое измерение состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. №2. С. 62–68.
19. **Шевченко А.Н., Захарова Е.А.** Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. №.4. С. 567–573.
20. **Вершовский А. К. и др.** Влияние поляризационных характеристик пробного излучения на сигнал оптически детектируемого магнитного резонанса в магнитометрических и гироскопических квантовых датчиках // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45. №. 20. С. 3–6.
21. **Малеев Н.А., Блохин С.А., Бобров М.В., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М. Устинов В.М.** Источник лазерного излучения для компактного гироскопа на эффекте ЯМР // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №1. С. 81–92.
22. **Попов Е.Н., Баранцев К.А., Ушаков Н.А., Литвинов А.Н., Лиокумович Л.Б., Шевченко А.Н., Скляров Ф.В., Медведев А.В.** Характер сигнала оптической схемы квантового датчика вращения на основе ядерного магнитного резонанса // Гироскопия и навигация. 2018. №1 (100). С. 93–106.
23. **Popov, E.N., et al.,** The Frequency Shifts of the Nuclear Magnetic Momenta Larmor Precession in the Mixture of Two Noble Gases, *Applied Magnetic Resonance*, 2017, vol. 48, no. 8, pp. 761–770.

24. **Попов Е.Н., Баранцев К.А., Литвинов А.Н., Курапцев А.С., Воскобойников С.П., Устинов С.М., Ларионов Н.В., Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А., Шевченко А.Н.** Частотная линия ядерного магнитного резонанса в квантовом датчике вращения: негативное влияние схемы детектирования // Гироскопия и навигация. 2016. №4 (95). С. 3–13.
25. **Белов Л. и др.** Формирование колебаний и сигналов: учебник для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., пер. и доп. М.: Издательство «Юрайт», 2018.
26. **Абубакиров Э.Б., Конюшков А.П.** О мягком и жестком режимах генерации в лампе обратной волны // Изв. ВУЗов, Радиофизика. 2010. Т. 53. С. 645–651.
27. **Белов Л.А., Богачев В.М., Благовещенский М.В.** Устройства генерирования и формирования радиосигналов: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1994.
28. **Медиченко М.П., Литвинов В.П.** Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие. М.: Изд-во МГОУ, 2011.
29. **Küpfmüller, K.,** Über die Dynamik der selbsttätigen Verstärkungsregler (On the dynamics of automatic gain controllers), *Elektrische Nachrichtentechnik*, 1928, vol. 5, no. 11, s. 459–467.
30. **Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е.** Устройства приема и обработки сигналов: учебное пособие. Ч. 3. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. 52 с.
31. **Фомин Н.Н. и др.** Радиоприемные устройства: учебник для вузов. 3-е издание, стереотип. М., 2007. 520 с.

Bezmen, G.V., Shevchenko, A.N., Kostin, P.N., Berzeitis, A.N., Bezmen, V.S., Petrov, V.I. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia)

Two-Frequency Oscillation System in the Architecture of an Angular Rate Sensor, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 19–30.

Abstract. The paper considers the specific features of feedback circuit implementation in an angular rate quantum sensor based on a two-frequency spin oscillator on xenon isotopes. Technical solutions which ensure stable two-frequency oscillation, such as automatic gain control units and phase filters, are listed. The results of experimental studies of oscillation modes on breadboard angular rate quantum sensor with stationary and rotating base are presented.

Key words: angular rate quantum sensor, spin oscillator, feedback, nuclear magnetic resonance.

Материал поступил 20.01.2020