

УДК 629.7.05:004.032.2

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-4-67-79

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДЛЯ КВАНТОВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЬЮТЕРА

С.В. ДИАНОВ<sup>1</sup>, В.М. НОВИЧКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

Современные и перспективные задачи робототехники с управлением от систем искусственного интеллекта требуют применения малогабаритных измерительных устройств. В этом случае хорошую перспективу имеют интенсивно разрабатываемые квантовые датчики и квантовые компьютеры. Их основным преимуществом является способность успешно обрабатывать данные случайных процессов с разложением сложных функций на простые множители, а также их малые габариты и способность передавать данные на большие расстояния без проводов. Данные, передаваемые по квантовым линиям связи, невозможно ни скопировать, ни перехватить, что очень полезно при удаленном управлении сложными техническими системами. По результатам анализа вероятностных зашумленных данных квантовый компьютер способен быстро выработать оценку технического состояния сложной системы. При этом нет необходимости перебирать все возможные варианты решения задачи оценивания с огромным количеством входных данных, некоторые из которых иногда могут быть не определены. Основной проблемой в исследованиях квантовых процессов является то, что исследователи изучают процессы, протекающие в материалах, но они не указывают пути применения квантовых датчиков и квантовых компьютеров в практических приложениях. В настоящей статье поясняется, как формировать измерительный канал, совместимый с квантовым компьютером, как организовать ввод информации об измеряемой физической величине в квантовый компьютер при помощи квантового датчика. Основная цель состояла в том, чтобы приблизить результаты фундаментальных исследований в области квантовых вычислений к их применению в прикладных задачах. Показано, как квантовые процессы можно переложить в область технических измерений физических величин, используемых при автоматической диагностике технического состояния сложных систем. В процессе получения результатов исследования применялся метод дедукции (выведения) заключений на основе анализа свойств объекта исследования (алмаза с NV-центром) с учетом существующих экспериментальных данных в рамках системного подхода к разработке элементов технических систем. В результате дано описание процессов в квантовом измерительном канале, который используется для ввода диагностических данных в квантовый компьютер. К основным выводам исследования нужно отнести то, что квантовые датчики, реализованные в виде измененного кристалла алмаза, хорошо описываются с помощью теории измерительных преобразователей с частотным выходом и могут быть использованы в диагностических компьютерах.

**Ключевые слова:** измерительный канал, NV-центр, квантовый датчик, квантовый компьютер, преобразователь с частотным выходом.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные сложные технические системы и перспективы их применения в условиях наступающего 6-го технологического уклада предполагают учет новых требований, когда используемые в них робототехнические средства, управляемые искусственным интеллектом, должны быть целостными, с полным охватом информации от всех встроенных в них элементов, а их алгоритмы адекватны условиям их применения. Новые технологии промышленного производства сложных технических систем позволяют повысить их надежность и точность, но при автоматическом управлении ими требуется иметь адекватную информацию об их текущем техническом состоянии, которое определяется путем анализа диагностических признаков для получения заключения (диагноза) о природе неисправности или отказа. Признаками, характеризующими способность объекта выполнять требуемые функ-

ции и его соответствие установленным требованиям, по которым можно определить вид технического состояния диагностируемого объекта, служат отказы его элементов или неисправности. Невыявленные отказы способны привести к неадекватности алгоритмов управления, а это в свою очередь приводит к высокой вероятности потери объекта, в котором установлена эта управляющая система.

Для повышения достоверности и точности выполнения функциональных задач сложные технические системы должны содержать все большее количество датчиков и преобразователей информации. Их количество подчас достигает сотен штук. Если датчики выполнять по традиционной технологии, то в этом случае их габариты и масса сильно увеличатся, что неприемлемо для перспективных систем. В этом случае целесообразно использовать нанодатчики с квантовыми первичными преобразователями. Установка десятков и даже сотен датчиков в перспективных системах приведет к необходимости построения сложных диагностических алгоритмов, когда входными данными будут по существу параметры случайных процессов. Это сложно для традиционных компьютеров. Иногда при этом возникает необходимость разложения сложных функций на простые множители. С такими задачами хорошо справляются квантовые компьютеры, которые в настоящее время интенсивно разрабатываются во всем мире. При этом перспектива квантовых компьютеров направлена на получение быстрой оценки сложно определимого состояния при входных данных, которые часто не поддаются численным методам вычисления. А иногда из-за отказов датчиков и других элементов таких сложных технических систем, часть входных данных будет отсутствовать, что возможно при влиянии на объект диагностирования внешних воздействий, уровень которых превышает предел прочности его элементов и также служит препятствием для решения подобных задач традиционными средствами.

Особенности решения задач в квантовых компьютерах позволяют сделать вывод о том, что они способны быстро выработать оценку технического состояния сложной системы по результатам анализа вероятностных зашумленных данных. Особенность квантовых компьютеров состоит в том, что при их применении нет необходимости перебирать все возможные варианты решения задачи оценивания с огромным количеством входных данных.

К объектам технического диагностирования, для которых предлагается применять представленную в статье методику расчета измерительных преобразователей на основе модифицированного алмаза с NV-центром, можно отнести, например, элементы конструкции планера самолета, элементы топливных, масляных, гидравлических и пневматических систем, находящиеся под давлением, а к контролируемым параметрам – силу, давление и перемещение.

## МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того чтобы перейти от фундаментальных исследований в области квантовых датчиков и квантовых компьютеров к их практической реализации при разработке прикладных задач, целесообразно обратиться к ранним разработкам датчиков подобного типа. Это позволит ускорить процесс перевода результатов теоретических изысканий в практическую плоскость. Для решения этой задачи применен метод дедукции (выведения) заключений на основе анализа свойств объекта исследования (алмаза с NV-центром) и полученных [1–3] экспериментальных данных с целью их систематизации в рамках классической теории измерительных систем для облегчения синтеза измерительного преобразователя на основе алмаза с NV-центром, который предлагается использовать для ввода данных в квантовый компьютер с диагностическими целями. Этот метод применен в рамках общего подхода к проектированию новых образцов технических изделий с опорой на гипотетико-дедуктивный метод в рамках системного подхода к разработке элементов сложных технических систем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании под измерительным каналом для квантового диагностического компьютера понимается функционально выделяемая часть измерительной системы, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины.

Помимо силы, давления и перемещения в квантовый компьютер могут вводиться значения таких физических величин, которые могут изменять колебательные свойства алмазной пластины. Геометрические размеры такой пластины определяют диапазон измерения контролируемой физической величины, которая в свою очередь отражает состояние параметра диагностируемого объекта. После промежуточного преобразования внутри модифицированной алмазной пластины с NV-центром на выходе преобразователя появится фотон/фонон, воспринимаемый квантовым компьютером для дальнейшего преобразования в соответствии с логикой диагностического алгоритма.

Анализ особенностей алмаза с измененной кристаллической решеткой в виде NV-центра показал, что этот элемент может быть использован в качестве основы для построения измерительного канала для квантового диагностического компьютера. Характеристики такого алмаза позволяют использовать его как измерительный преобразователь традиционного типа и как измерительный преобразователь для квантового компьютера. Квантовые датчики на основе алмаза с NV-центром можно описать средствами существующей теории измерительных преобразователей с частотным выходом [4, 5]. Способность таких измерительных преобразователей генерировать фотоны и фононы позволяет использовать их непосредственно в квантовых компьютерах без дополнительных устройств ввода информации. В сложных технических системах, используемых в диагностических целях, часто на обработку одновременно подается большое количество данных, имеющих вероятностную природу. Эта ситуация хорошо разрешается в квантовых компьютерах.

Показано, что при расчетах параметров квантового датчика следует разделить модифицированную алмазную пластину на два «виртуальных» элемента: чувствительный элемент (сама пластина) и последующий преобразователь (созданный внутри нее NV-центр). Алмазная пластина в существующей теории генераторных датчиков именуется резонатором [4, 5]. Классические датчики генераторного типа отличаются от такой измененной пластины тем, что классический резонатор (чувствительный элемент) стараются делать без изъянов для обеспечения чистоты гармонических колебаний. Особенности квантовых технологий позволили внести такие изменения в пластину, не меняя ее механических свойств, которые дали возможность объединить в одном элементе и первичный, и последующий преобразователи.

После того как создана совокупность первичного и последующего преобразователей в виде алмазной пластины с NV-центром прямоугольной или круглой формы с рассчитанными на заданную частоту размерами, необходимо заставить ее колебаться. Для этого следует разработать систему возбуждения колебаний. Такая колеблющаяся алмазная пластина способна формировать выходной сигнал, который с помощью системы съема сигнала может подаваться непосредственно на вход квантового компьютера.

Это формирует измерительный канал иного функционального типа, когда измерительный канал формируется не путем объединения некоторых технических средств, а за счет такой организации взаимосвязанных физических процессов в алмазе и вокруг него, которая позволяет заменить часть традиционных объемных элементов измерительного канала физическими процессами, выполняющими их функции. Это позволяет существенно уменьшить размеры устройств ввода данных с одновременным сопряжением с форматом информационного обмена, используемого в квантовых компьютерах.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенностью квантового компьютера является организация вычислительного процесса, для реализации которого необходимо в строгом соответствии с диагностическим алгоритмом с помощью специальных технологических средств организовать внутри кристалла строгие связи. Это приводит к тому, что функциональные преобразования входных параметров в выходные изменить в процессе его эксплуатации будет уже нельзя. С одной стороны, это повышает надежность вычислений, а с другой – уменьшает их способность к реконфигурации. При обработке данных с диагностическими целями в алгоритме потребуется четко отразить структуру диагностируемого объекта, что ведет к специализации вычислителя (компьютера). Таким образом, квантовый диагностический компьютер – это компьютер, использующий явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности для передачи и обработки данных в диагностических целях для контроля работоспособности устройств подсистем, режимов работы, обнаружения отказов и перевода системы на резервный режим работы. Целью создания такого компьютера является обеспечение автоматического формирования диагноза состояния бортовых систем и выдачи рекомендаций относительно планирования необходимых работ по техническому обслуживанию. При этом преимущества квантовых вычислений позволят повысить эффективность оценки технического состояния диагностируемых объектов за счет их способности быстро обрабатывать большое число данных, имеющих вероятностный характер. Основой для построения диагностического квантового компьютера будут диагностические параметры, которые должны поступать на обработку по соответствующим измерительным каналам.

При формировании измерительного канала важны характеристики первичного преобразователя, который является основой датчика измеряемой физической величины. Это связано с тем, что при низких точностных показателях датчика невозможно будет получить высокие точностные характеристики параметра, передаваемого в диагностический алгоритм. С другой стороны, высокие точностные характеристики датчика будут излишни, если невозможно обеспечить их ввод в диагностический квантовый компьютер без дополнительных помех, генерируемых в измерительном канале и приводящих к искажениям измерительной информации.

Основной проблемой здесь является то, что в опубликованных результатах исследований [1, 6] описываются квантовые процессы, протекающие в материалах, но не указывается, как их положительные свойства можно применить на практике.

Описываемая в работе [7] успешная реализация чувствительного элемента на основе кристалла алмаза может позволить с его помощью воспринимать параметры, необходимые для диагностики технического состояния элементов сложных технических систем. В работе [2] он назван элементарным вычислительным элементом для квантового компьютера. Этот элемент называют q-битом и он реализован на базе алмаза с искусственно созданным дефектом кристаллической решетки. Это элемент алмазной пластины с измененной кристаллической решеткой, в которой один атом углерода ( $^{13}\text{C}$ ) заменяется атомом азота (N) и одно из соседних с ним мест в решетке специально освобождается от атома углерода. Это место остается свободным (V). Такое расположение атомов в алмазе названо NV-центром [8, 9]. У такого дефектного NV-центра имеется ось, проекция спина электрона на которую служит в качестве q-бита. С традиционной точки зрения на измерительные преобразователи NV-центр можно рассматривать как чувствительный элемент. Показано [2], что NV-центр способен воспринимать изменение частоты колебаний алмазной пластины, что позволяет строить на его основе квантовые датчики. Поскольку во вставке создается несколько NV-центров, то в качестве проекции измерительной оси рассматривается суммарная проекция всех спинов электронов из вставки.

При построении измерительного канала на основе такой пластины можно предположить, что NV-центр является чувствительным элементом. Однако, как и следует из классической теории резонаторных датчиков [4], чувствительным элементом является сама алмазная пластина, а

NV-центр – это специально внедренный в нее последующий преобразователь. Для обеспечения восприятия измеряемой физической величины чувствительный элемент следует заставить колебаться, а для обеспечения работы последующего преобразователя (NV-центра) его следует активировать посредством облучения лазером.

Таким образом, из всего двух составляющих (измененная пластина и система возбуждения колебаний) создается измерительный канал для квантового компьютера. На выходе такого измерительного канала формируется аналоговый сигнал, который в дальнейшем может сниматься методом спектрографии с воздействием на NV-центр радиочастотного поля.

При этом существует два способа снятия выходной информации.

Первый состоит в том, что свечение NV-центра в базовом состоянии чистый «0» более яркое, чем в базовом состоянии чистая «1». Реальное состояние в таком квантовом датчике будет суперпозицией этих двух состояний. Скорость записи информации в такую ячейку составляет порядка десятков наносекунд, а съем информации идет путем оценки яркости свечения ячейки. Известной проблемой квантовых вычислителей является их нестабильность, но в данном случае использование связки NV-центра со спином электрона ядра  $^{13}\text{C}$  позволяет хранить информацию в этом ядерном спине в течение нескольких секунд. Наличие фотонов в излучении позволяет вводить этот сигнал непосредственно в квантовый компьютер, в котором дальнейшие преобразования измеренного сигнала пойдут за счет анализа и изменения поляризации светового излучения каждого q-бита.

Второй способ снятия информации с NV-центров разработан в швейцарском Институте нанотехнологий (Swiss Nanoscience Institute) и университете Базеля (University of Basel). Здесь резонатор представляет собой консольно-закрепленную алмазную пластину с NV-центрами, в которой создаются механические напряжения, которые могут управлять ее квантовой структурой. Когда алмазный резонатор совершает механические колебания, возбуждаемые пьезоэлементом, то изменяющиеся при этом механические напряжения влияют на спины электронов NV-центров. Быстродействие датчиков, созданных на алмазных резонаторах с деформированной кристаллической решеткой, составляет порядка 0,1 миллисекунды. Исследователи полагают [3], что такие резонаторы могут являться элементами квантового вычислителя, а в рассматриваемом случае – источником измеренного сигнала для квантового вычислителя, что позволит с небывалой до сих пор скоростью получать информацию об изменяющихся механических напряжениях в системе. Также это свойство позволяет, минуя тракт передачи данных, считывать и обрабатывать информацию непосредственно в месте ее формирования. На практике это позволит существенно уменьшить потери при передаче информации, снизить энергозатраты и убрать существенное количество электропроводов в формируемых измерительных каналах.

Оба эти способа снятия информации соответствуют вибрационным датчикам. Теория вибрационных датчиков [4, 5] достаточно хорошо проработана применительно к другим материалам чувствительного элемента и другим условиям его работы. Вибрационные свойства алмаза, используемого в квантовом датчике, также изучались для других приложений [7].

Итак, физический процесс, параметры которого определяются, влияет на алмазную пластину, меняя ее жесткость и, как следствие, частоту ее собственных колебаний. Затем изменяющаяся частота колебаний пластины влияет на свойства NV-центров в пластине, которые генерируют фотоны/фононы, позволяя использовать такой элемент для ввода данных в квантовый компьютер непосредственно.

Такой квантовый измерительный канал будет совмещать простоту и универсальность аналоговых устройств с точностью и помехозащищенностью цифровых устройств.

Исходя из классификации [4] измерительных преобразователей генераторного типа, по физической природе квантовый датчик является механическим, по принципу действия может быть реализован как резонаторный или частотно зависимый, по режиму работы – работающий в режиме свободных колебаний или автоколебаний.

Работа такого измерительного канала базируется на способности резонатора (алмазной пластины с NV-центром) изменять свою собственную частоту под воздействием измеряемого параметра. Здесь режим свободных колебаний реализуется при возбуждении резонатора от некоторого генератора импульсов (системы возбуждения), когда после окончания импульса в резонаторе возникает колебание свободной частоты  $\omega_c$

$$\omega_c = \omega_m \sqrt{1 - d^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_m$  – частота собственных колебаний;  $d$  – коэффициент относительного затухания.

Информационным параметром является частота  $\omega_c$ , которая и зависит от измеряемой физической величины.

При работе измерительного преобразователя в режиме автоколебаний выходной сигнал с резонатора через усилитель следует подать на обратный преобразователь и затем на возбудитель резонатора, замыкая тем самым контур положительной обратной связи. Если коэффициент относительного затухания  $d$  из формулы (1) много меньше 1, то частота колебаний резонатора будет близка к частоте собственных колебаний  $\omega_m$ . Замеряя эту частоту, можно судить об измеряемой физической величине.

Такой механический резонатор является основой всего измерительного канала. Заставить его колебаться на заданной частоте без паразитных гармоник, как правило, очень не просто. Алмазная пластина является сложной колебательной системой [4] со многими степенями свободы и имеет несколько резонансных частот. Частота собственных колебаний резонаторов определяется их жесткостью  $k$  и массой  $m$  и в простейшем случае (например, для маятника-преобразователя с изменяющейся сосредоточенной массой) может быть описана, как

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

когда измеряемая величина  $x$  воздействует на жесткость  $k$  резонатора, изменяя тем самым частоту его собственных колебаний.

Поскольку алмазная пластина с NV-центром относится к колебательным системам с распределенными параметрами, то ее резонансная частота зависит от распределенных значений массы и упругости. Преимуществом здесь является, во-первых, возможность изменения резонансной частоты без предварительного преобразования измеряемой величины и, во-вторых, высокая добротность, которая, например, у кварцевых пластин достигает  $5 \cdot 10^7$ .

Наличие энергетического пробоя спектра в резонансе спина электрона было обнаружено исследователями [3] в 2015 году. Этот энергетический пробой является свойством алмазной пластины с NV-центром, его ширина изменяется в зависимости от частоты ее колебаний и он несет полезную информацию об измеряемом параметре.

Энергетический пробой спектра в резонансе спина электрона проявляется в случае, когда лазер возбуждает NV-центр своим излучением и образуется фотон, который как бы одет в энергетическое поле, – фонон [10]. При этом спектр частицы расщепляется в переменном поле, а спектр атома представляет собой три полосы. Эти три полосы при приложении механических колебаний к пластине способны разрываться. При этом было показано [3], что частота прикладываемых механических напряжений  $\omega$  может влиять на состояние NV-центра. При достижении  $\Omega_m$  (частота Раби, которая количественно описывает взаимодействие резонансного излучения с дипольным моментом атома) возникает энергетический пробой (эффект Отлера – Таунса, АТ-эффект), который хорошо виден с помощью микроволнового спектроскопа. Между спином

атома и магнитным резонансом существует связь. Суть состоит в том, что после достижения частоты  $\Omega_m$  квантовые свойства NV-центра напрямую зависят от механических нагрузок в алмазной пластине. Известно [3], что при достижении резонанса  $\omega_m$  колебаний, генерируемых внешним источником (например, пьезоэлементом), и собственной частотой алмазной пластины будет проявляться эффект энергетического пробоя. Величина этого пробоя зависит от частоты  $\Omega_m$  колебаний алмазной пластины с NV-центром. В случае когда измеряемая физическая величина влияет на жесткость этой пластины, она будет отображаться в виде ширины наблюдаемого энергетического пробоя, так как жесткость материала пластины напрямую связана с частотой ее собственных колебаний. Ширина энергетического пробоя в этом случае будет служить информационным параметром и одновременно q-битом для квантового компьютера.

Для формирования описываемого измерительного канала для квантового компьютера потребуется один чувствительный элемент в виде алмазной пластины с NV-центром. Частота ее собственных колебаний будет зависеть от ее размеров, геометрической формы и способа крепления пластины к некоторому основанию. Воспользовавшись известными формулами, можно рассчитать габаритные размеры измерительной алмазной пластины для ее работы в диапазоне частот, необходимом для возникновения Раби-частоты, которая будет соответствовать значению измеряемого параметра.

В соответствии с разработанной методикой [7] можно приближенно рассчитать необходимые геометрические размеры алмазной пластины нужной формы и с требуемой частотой механического резонанса. Частота механического резонанса  $f_m$  определяется по формуле

$$f_m = F \cdot C, \quad (3)$$

где  $C$  – скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, которая для алмаза составляет 18300 м/с,  $F$  – коэффициент формы, вычисляемый следующим образом:

$$F = \frac{K(1,17 - \frac{h}{d}) \frac{h}{d^2}}{\sqrt{1 - \mu^2}}, \quad (4)$$

где  $h$  – высота (толщина) пластины,  $d$  – диаметр вписанной окружности,  $\mu$  – коэффициент Пуассона, который для алмаза составляет 0,07,  $K$  – коэффициент, зависящий от формы и способа закрепления пластины (определяется экспериментально).

Подставляя (4) в (3), можно рассчитать размеры алмазной пластины, настраивая ее на желаемый диапазон рабочих частот.

При построении измерительного преобразователя из алмаза удобно придать ему квадратную или круглую форму. Эти формы довольно технологичны. Некоторые значения коэффициента формы для предварительных вычислений с помощью формулы (4) следующие.

Для квадратной пластины, при закреплении ее за угол  $K = 0,603$ , при закреплении за край  $K = 0,879$ , при закреплении за середину  $K = 1,022$ . Для пластины круглой формы: при закреплении за край  $K = 0,954$ , при закреплении за середину  $K = 1,298$ .

Таким образом, процесс конструирования чувствительного элемента из алмаза с NV-центром для формирования квантового измерительного канала, который будет настроен на определенный диапазон частот механических колебаний, условно можно разделить на 2 этапа: 1) необходимо создать NV-центр в алмазной пластине и 2) необходимо рассчитать и изготовить ее с определенными геометрическими параметрами и соответствующим образом ее закрепить. После этого надо сформировать систему возбуждения колебаний для алмазной пластины.

Важное значение при формировании измерительного канала имеет статическая характеристика его первичного преобразователя (чувствительного элемента), т. е. зависимость выходного параметра алмазной пластины от входного. Выходным параметром является частота соб-

ственных колебаний, а входным параметром – жесткость (зависит как от материала, так и от геометрии) алмазной пластины –  $x$ . Алмаз упруго деформируется при небольшой нагрузке, а его жесткость зависит от модуля упругости (модуля Юнга  $E$ , т. е. отношения напряжения к деформации при очень малой деформации). Поскольку скорость  $C$  распространения продольной волны в тонком стержне определяется через модуль Юнга как

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества, то, влияя на плотность вещества, можно управлять собственной частотой колебаний измерительной пластины.

Таким образом, статическая характеристика, часто обозначаемая буквой  $f$ , в идеальном случае есть функция одного параметра:

$$f = f(x). \quad (6)$$

На практике если, как в рассматриваемом случае, в качестве резонатора используется механический элемент, то статическую характеристику можно представить в виде

$$f = f_m \sqrt{1 + kx}, \quad (7)$$

где  $f_m$  – частота собственных колебаний резонатора;  $k$  – коэффициент, зависящий от конструктивных, геометрических, температурных и других факторов, которые можно контролировать при изготовлении алмазной пластины и учитывать при проведении измерений.

Поскольку любое аналитически полученное выражение будет носить чисто теоретический характер, то на практике выходную характеристику рассматриваемого измерительного канала следует определять экспериментальным путем, например, с помощью квадратической аппроксимации экспериментальных данных.

Исходя из аналитического описания (7), на практике необходимо аппроксимировать экспериментальные данные квадратичной зависимостью и определить оценки величин  $f_m$  и  $k$ . Для этого сначала удобно преобразовать выражение (7) к виду

$$x = bf^2 - a, \quad (8)$$

где  $a = k^{-1}$ ;  $b = \frac{1}{f_m^2 k} = \frac{a}{f_m^2}$ .

Отсюда целевая функция, которая минимизируется соответствующим выбором  $f_m$  и  $k$ , принимает вид

$$J = \sum_{i=1}^n [x_i - (bf_i^2 - a)]^2, \quad (9)$$

где  $f_i$  – частота выходного сигнала, определяемая через ширину энергетического пробоя спектра в резонансе спина электрона и соответствующая  $i$ -му измеренному значению  $x_i$ ;  $n$  – количество значений выходной величины, полученных при эксперименте.

Выражения для оценок  $\hat{f}_m, \hat{k}$ , минимизирующих целевую функцию  $J(9)$ , имеют вид

$$\hat{f}_m^2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i^2 \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n f_i^4 \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n f_i^2}; \quad \hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i^4 - (\sum_{i=1}^n f_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n f_i^2 \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n f_i^4 \sum_{i=1}^n x_i}. \quad (10)$$

Использование формул (10), как правило, дает хорошую аппроксимацию экспериментальных данных с малой приведенной погрешностью.

Помимо квадратичной аппроксимации часто бывает необходимо использовать линейную аппроксимацию выходной статической характеристики в соответствии с теми же экспериментальными данными в заданном диапазоне измеряемых входных величин. В этом случае статическая характеристика аппроксимируется выражением

$$f = ax + b. \quad (11)$$

Выражения для значений оценок  $\hat{a}, \hat{b}$ , которые минимизируют функцию потерь в случае линейной аппроксимации (11), имеют вид

$$\hat{a} = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i x_i - \sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n f_i x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (12)$$

Применение линейной аппроксимации по формулам (12) может оказаться очень полезным при построении квантовых гейтов с целью автоматической калибровки формируемого измерительного канала. Однако следует помнить о том, что линейная аппроксимация статической характеристики в случае использования механического резонатора дает несколько худший (иногда на порядок) результат, чем квадратичная аппроксимация.

Как уже отмечалось, для того чтобы заставить работать алмазную пластину в качестве чувствительного элемента в измерительном канале для квантового компьютера, необходима система возбуждения колебаний. Без нее измерения невозможны, так как в этом случае колебания не возникнут и квантовые свойства NV-центра изменяться не станут. Также необходима система съема выходного сигнала с алмазной пластины, если предполагается вводить сигнал также и в традиционный цифровой компьютер.

При исследованиях [2, 7] квантовых свойств алмазной пластины с NV-центром применен режим ее независимого возбуждения, что не подходит для применения в измерительном канале, где целесообразно применить режим самовозбуждения. Тогда параметры выходного сигнала системы возбуждения будут напрямую связаны с параметрами колебаний резонатора. В этом случае механические колебания резонатора будут зависеть от его собственных колебательных свойств. Для реализации зависимости между параметрами колебаний резонатора и параметрами возбуждающего эти колебания сигнала в схему необходимо ввести элементы положительной обратной связи, которые обеспечат самовозбуждение чувствительного элемента.

Таким образом, для обеспечения и поддержания режима самовозбуждения в схему измерительного канала помимо первичного преобразователя (алмазной пластины), последующего

преобразователя (NV-центра), системы съема выходного сигнала и системы возбуждения колебаний следует ввести систему съема колебаний пластины, которая будет являться источником сигнала для создания положительной обратной связи с целью самовозбуждения колебаний алмазной пластины путем приложения к резонатору вынуждающей силы, например с помощью пьезоэлемента. Такой способ раскачки [4] резонатора должен обеспечить приложение вынуждающей силы, распределенной по его поверхности в определенном соответствии с избранной формой колебаний. При этом система возбуждения колебаний резонатора должна включать генератор возбуждающих сигналов и совокупность элементов, преобразующих сигналы генератора в вынуждающую силу, а система съема колебаний – совокупность элементов, вырабатывающих сигнал, частота которого зависит от частоты механических колебаний резонатора.

В существующих традиционных (не квантовых) датчиках резонаторного типа в качестве системы возбуждения применяют [4, 5] обратные преобразователи электромагнитного, электростатического, магнитоэлектрического и других типов. Выбор способа возбуждения и типа возбуждения определяется свойствами материала резонатора. Если он выполнен из магнитного материала, то системы возбуждения и регистрации представляют собой поляризованные электромагниты, а если из немагнитного, то системы возбуждения и съема представляют собой магнитоэлектрические или электростатические преобразователи. Таким образом, для построения системы возбуждения для алмазной пластины следует выбирать преобразователи магнитоэлектрического или электростатического типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье подход показывает, как представить измерительный канал для квантового диагностического компьютера на основе кристалла алмаза в виде следующих элементов: первичного преобразователя, последующего преобразователя и системы возбуждения колебаний, чтобы его можно было рассчитывать с помощью классической теории измерительных систем. Здесь система съема колебаний является вспомогательной и служит для поддержания колебаний алмазной пластины в процессе работы измерительного канала. Съем информации с формируемого измерительного канала осуществляется автоматически при его интеграции в квантовый диагностический компьютер. Это связано с тем, что сама алмазная пластина способна формировать q-бит, органично воспринимаемый квантовым компьютером.

В качестве первичного преобразователя используется алмазная пластина, способная воспринимать измеряемую физическую величину, которая оказывает влияние на частоту ее собственных колебаний путем изменения ее жесткости.

Последующим преобразователем является специально внедренный в пластину NV-центр, состояние которого зависит от частоты прикладываемых механических напряжений: после достижения частоты Раби квантовые свойства NV-центра напрямую зависят от механических нагрузок в алмазной пластине, и его состояние определяется свойствами генерируемого фотона/фонона, которые в свою очередь несут информацию об измеряемом параметре.

Выходным параметром формируемого измерительного канала является энергетический пробой спектра в резонансе спина электрона, проявляющийся в виде фотона/фонона, либо электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне, воспринимаемого микроволновой антенной. Здесь информацию о диагностическом параметре (измеряемой физической величине) несет ширина наблюдаемого энергетического пробоя, которая напрямую зависит от частоты собственных колебаний алмазной пластины и является q-битом для квантового компьютера. Способность генерировать фотоны и фононы позволяет использовать такой измерительный канал непосредственно в квантовых компьютерах для целей диагностики сложных технических систем, когда на обработку одновременно поступает большое количество данных, имеющих вероятностную природу.

К достоинствам представленного подхода по формированию измерительного канала для квантового диагностического компьютера следует отнести возможность его описания средствами уже существующей квантовой теории, теории гармонических колебаний и теории измерительных систем. Это обеспечивает плавный переход от построения измерительных систем на базе существующих традиционных элементов измерительных систем к элементам на базе нанотехнологий и квантовых компьютеров. На практике рассмотренный подход будет полезен при разработке микродатчиков силы, давления и перемещения для диагностических средств принципиально новых интегрированных систем летательных аппаратов при их создании и отработке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Массалимов Б.** Квантовый компьютер из алмаза [Электронный ресурс] / АНИ «ФИ-АН-информ» // Сделано у нас. Нам есть чем гордиться. Режим доступа: <https://sdelanounas.ru/blogs/46236/> (дата обращения: 07.04.2018).
2. **Fedyanin D.Yu., Agio M.** Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures // *New Journal of Physics*. 2016. Vol. 18, № 7. Pp. 073012. DOI:10.1088/1367-2630/18/7/073012
3. **Barfuss A.** Strong mechanical driving of a single electron spin / J. Teissier, E. Neu, A. Nunnenkamp, P. Maletinsky // *Nature Physics*. 2015. Vol. 11, № 10. Pp. 820–824. DOI:10.1038/NPHYS3411
4. **Горенштейн И.А.** Гидростатические частотные датчики первичной информации. М.: Машиностроение, 1976. 182 с.
5. **Эткин Л.Г.** Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 408 с.
6. **Saito S.** Coherent coupling between a superconducting qubit and a spin ensemble / X. Zhu, W.J. Munro, K. Semba // *NTT Technical Review*. 2012. Vol. 10, № 9, Sept. Pp.1–7.
7. **Волков Д.И., Проскураков С.Л.** Ультразвуковой метод контроля качества режущих пластин из сверхтвердых материалов // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2016. Т. 18, № 1(2). С. 166–169.
8. **Sjolander T.F.** 13C-decoupled j-coupling spectroscopy using two-dimensional nuclear magnetic resonance at zero-field / A. Kentner, A. Pines, M.C.D. Tayler, D. Budker // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2017. Vol. 8, № 7. Pp. 1512–1516. DOI:10.1021/acs.jpcclett.7b00349
9. **Bhallamudi V.P., Hammel P.C.** Nitrogen-vacancy centers: Nanoscale MRI // *Nature Nanotechnology*. 2015. № 10. Pp. 104–106. DOI:10.1038/nnano.2015.7
10. **Ohtsu M.** Dressed photon technology // *Nanophotonics*. 2012. № 1. Pp. 83–97. DOI:10.1515/nanoph-2011-0001

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дианов Сергей Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей Московского государственного университета гражданской авиации, [tehnomat@ya.ru](mailto:tehnomat@ya.ru).

**Новичков Вадим Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных комплексов ориентации и навигации Московского авиационного института (национального исследовательского университета), [v13217@ya.ru](mailto:v13217@ya.ru).

## FORMATION OF THE MEASURING CHANNEL FOR QUANTUM DIAGNOSTIC COMPUTER

Sergey V. Dianov<sup>1</sup>, Vadim M. Novichkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

### ABSTRACT

Modern and perspective tasks of robotics with control from artificial intelligence systems require the use of small-sized measuring devices. In this case, the intensively developed quantum sensors and quantum computers have good prospects. Their main advantage is the ability to successfully process the data of random processes with decomposition of complex functions into simple multipliers, as well as their small size and the ability to transmit data over long distances without wires. Data transmitted over quantum communication lines cannot be copied or intercepted, which is very useful for remote control of complex technical systems. Based on the results of the probabilistic noisy data analysis quantum computer can quickly develop an assessment of the complex system technical condition. At the same time, there is no need to go through all the possible solutions to the evaluation problem with a huge amount of input data, some of which can sometimes be undefined. The main problem in the research of quantum processes is that researchers study the processes occurring in materials, but they do not indicate the ways in which quantum sensors and quantum computers are used in practical applications. This article explains how to form a measurement channel that will be compatible with a quantum computer, how to organize the input of information about the measured physical quantity into a quantum computer using a quantum sensor. The main objective was to bring the results of basic research in the field of quantum computing closer to their application in applied tasks. It is shown how the quantum processes can be shifted to the field of physical quantities technical measurements used in the automatic diagnosis of the technical state of complex systems. In the process of obtaining the results of the study, the deduction method of conclusions within the framework of a systematic approach to the development of technical systems elements was used. The result is a description of the processes in the quantum measuring channel, which is used to enter diagnostic data in a quantum computer. The study main conclusions breed the idea that quantum sensors implemented in the form of a modified diamond crystal are well described by the theory of measuring transducers with frequency output and can be used in diagnostic computers.

**Key words:** measuring channel, NV-center, quantum sensor, quantum computer, converter with frequency output.

### REFERENCES

1. **Massalimov, B.** *Kvantovyy kompyuter iz almaza* [A quantum computer out of diamond]. [Electronic resource]. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/46236/> (accessed 07.04.2018) (in Russian)
2. **Fedyanin, D. Yu. and Agio, M.** (2016). *Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures*. *New Journal of Physics*, vol. 18, no. 7, pp. 073012. DOI: 10.1088/1367-2630/18/7/073012
3. **Barfuss, A., Teissier, J., Neu, E., Nunnenkamp, A. and Maletinsky, P.** (2015). *Strong mechanical driving of a single electron spin*. *Nature Physics*, vol. 11, no. 10, pp. 820–824. DOI: 10.1038/NPHYS3411
4. **Gorenshtein, I.A.** (1976). *Gidrostaticheskkiye chastotnyye datchiki pervichnoy informatsii* [Hydrostatic Frequency Sensors of Primary Information]. Moscow: Mashinostroeniye, 182 p. (in Russian)
5. **Etkin, L.G.** (2004). *Vibrochastotnyye datchiki. Teoriya i praktika* [Vibration and frequency sensors. Theory and practice]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 408 p. (in Russian)
6. **Saito, S., Zhu, X., Munro, W.J. and Semba, K.** (2012). *Coherent Coupling between a Superconducting Qubit and a Spin Ensemble*. *NTT Technical Review*, vol. 10, no. 9, Sept., pp. 1–7.
7. **Volkov, D.I. and Proskuryakov, S.D.** (2016). *Ultrazvukovoy metod kontrolya kachestva rezhushchikh plastin iz sverkhтвердых материалов* [Ultrasonic method of quality control of the cutting plates from supersolid materials]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Science], vol. 18, no. 1(2), pp. 166–169. (in Russian)

8. Sjolander, T.F., Kentner, A., Pines, A., Tayler, M.C.D. and Budker, D. (2017). *<sup>13</sup>C-decoupled j-coupling spectroscopy using two-dimensional nuclear magnetic resonance at zero-field*. The Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 8, no. 7, pp. 1512–1516. DOI: 10.1021/acs.jpcelett.7b00349

9. Bhallamudi, V.P. and Hammel, P.C. (2015). *Nitrogen-vacancy centers: Nanoscale MRI*. Nature Nanotechnology, no. 10, pp. 104–106. DOI:10.1038/nnano.2015.7

10. Ohtsu, M. (2012). *Dressed photon technology*. Nanophotonics, no. 1, pp. 83–97. DOI: 10.1515/nanoph-2011-0001

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey V. Dianov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computers, Complexes, Systems and Networks Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [tehnomat@ya.ru](mailto:tehnomat@ya.ru).

**Vadim M. Novichkov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automated Complexes of Orientation and Navigation Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), [v13217@ya.ru](mailto:v13217@ya.ru).

Поступила в редакцию 12.04.2018  
Принята в печать 23.07.2019

Received 12.04.2018  
Accepted for publication 23.07.2019