

Характеристика работы, выдвигаемой на премию им. Н.Н. Острякова.

«Разработка измерителя линейного ускорения с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями на отечественной элементной базе для современных БИНС»

Авторы: Нахов С.Ф., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Скоробогатов В.В.,
Николаенко А.Ю., Депутатова Е.А.

В 2002 предприятием ПО «Корпус» был разработан для системы управления спускаемого аппарата космического корабля «Союз-ТМА» прибор БИЛУ - шестиканальный измеритель кажущегося ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности кварцевых маятниковых акселерометров (КМА), также собственной разработки - акселерометров КХ67-041.

Акселерометры КХ67-041 имеют ряд аналогов, изготавливаемых как отечественными, так и зарубежными предприятиями (акселерометры АК-6, АК-15, ВК-9). Этот тип акселерометров является перспективным, т. к. имеет малые габариты, содержит небольшое количество деталей, позволяет создать измеритель достаточно высокого класса точности. Акселерометр КХ67-041 и разработанный на его базе прибор БИЛУ (блок измерителей линейного ускорения) позволили обеспечить создание измерителя линейного ускорения класса, характеризующегося стабильностью смещения нуля от запуска к запуску $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g и погрешностью масштабного коэффициента $\pm 0,02\%$, гарантируемыми на срок службы 12 лет. Однако, у этого типа приборов имеется существенная нелинейная зависимость от температуры нулевого сигнала и масштабного коэффициента, что требует применения компенсационных методов. В приборе БИЛУ была разработана и внедрена аппаратная система компенсации температурных зависимостей указанных параметров, защищенная патентами [1 - 2,9]. Идея аппаратной компенсации заключалась в том, что для каждого акселерометра, помещенного в специальную оболочку, создавался за счет релейного регулирования температуры внутри оболочки, температурный режим, исключающий ее снижение ниже 30°C , что обеспечивало работу системы температурной компенсации на линейном участке температурных зависимостей, для которых возможно применение аппаратной компенсации. Сама же компенсация состояла в том, что вырабатывались специально рассчитываемые компенсирующие напряжения, подаваемые на вход интегратора преобразователя «напряжение-частота» прибора БИЛУ для компенсации температурной зависимости смещения нуля акселерометра и на вход ключей преобразователя «напряжение-частота» для компенсации температурной зависимости масштабного коэффициента акселерометра.

Применение такой аппаратной компенсации температурных погрешностей кварцевых маятниковых акселерометров в приборе с преобразователем аналоговой информации тока обратной связи акселерометра в дискретную информацию с помощью преобразователя «напряжение - частота» путем введения компенсирующих напряжений требует использования высокоточной электронной компонентной базы. Так, для обеспечения указанных выше точностных характеристик, определяющих класс прибора, (стабильность смещения нуля от запуска к запуску $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g и погрешность масштабного коэффициента $\pm 0,02\%$ в течение 12 лет) потребовалось использовать источник опорного напряжения со стабильностью напряжения $\pm 0,0005\%$ AD780BNZ, быстродействующий интегратор на базе операционного усилителя ОРА 627SM, токовые ключи ADG723BRMZ. Отечественные элементы с такими характеристиками отсутствуют.

Прибор БИЛУ с аналоговым управлением измерительным каналом акселерометра проработал в системе управления КК «Союз - ТМА» и «Союз - МС» с 2002 по 2020 годы [1

- 1,3, 4-8]. В настоящее время выпущенные приборы этой серии работают в системе управления КК «Союз - МС», их эксплуатация завершается в 2020 году.

С 2006 года специалисты «ПО Корпус» начали разработку гироскопических систем управления с цифровыми обратными связями. По этому направлению выполнен целый ряд исследований [II – 1 -67], защищены две кандидатские диссертации [II – 69 - 70].

В 2014 году Правительством России была объявлена политика импортозамещения, проводимая на государственном уровне. К этому времени теоретические работы по созданию инерциальных чувствительных элементов с цифровыми системами управления были практически завершены, а сложившаяся ситуация привела к тому, что было принято решение заменить измерительный канал с аналоговым управлением в приборе БИЛУ на цифровой. В 2015 году с РКК «Энергия» был заключен договор на модернизацию прибора БИЛУ и переходе на цифровую систему управления измерительным каналом прибора, что позволило ввести алгоритмическую компенсацию температурных зависимостей смещения нулевого сигнала и масштабного коэффициента, сохранить достигнутый уровень точности прибора с использованием только отечественной элементной базы. С 2019 года модернизированный прибор поставляется в РКК «Энергия». Накопленный опыт в разработке кварцевых маятниковых акселерометров с цифровой обратной связью позволил сформулировать **комплекс задач**, который дал универсальное техническое решение, позволяющее без изменения конструкции и функциональной электроники подстраивать путём перепрограммирования ЦУОС кварцевый маятниковый акселерометр под широкий класс объектов, делая его универсальным.

1. Синтез регулятора цифровой системы обратной связи. Для этого необходимо выбрать метод синтеза цифрового регулятора и сформировать закон управления в конечно-разностной форме, причем метод синтеза цифрового регулятора должен выбираться таким, чтобы отвечать характеру внешних возмущающих воздействий, определяемых техническим заданием на блок акселерометров или БИНС в целом.

2. Разработка алгоритмов компенсации температурных погрешностей масштабного коэффициента и смещения нуля кварцевого маятникового акселерометра при обеспечении высоких требований к линейности масштабного коэффициента.

3. Разработка алгоритмов компенсации разбалансировки маятника КМА в диапазоне свыше 20 g при сохранении высоких точностных характеристик прибора по масштабному коэффициенту.

4. Внесение компенсационных поправок в закон управления при сохранении динамических характеристик системы управления.

5. Обеспечение работы системы при различных способах преобразования выходной информации ЦУОС, а именно: ЦАП, ЧИМ, ШИМ- преобразованиях.

6. Разработка программно - математического обеспечения (ПМО) для реализации управляющих алгоритмов внутри управляющего процессора акселерометра, а также ПМО для контроля прибора в условиях наземных испытаний.

7. Возможность расширения задач ЦУОС при дальнейших перспективных разработках, например, при обеспечении вибрационной защиты приборов путем разработки соответствующих алгоритмов, программируемых в ЦУОС.

Эти задачи носят общий характер. В ходе **разработки прибора БИЛУ** в рамках договора с РКК «Энергия» разработка цифровой обратной связи для кварцевого маятникового акселерометра позволила решить ряд практических задач, которые, естественно, являются частью общих:

1) обеспечить выполнение государственной политики импортозамещения путем модернизации прибора БИЛУ за счет разработки цифровой обратной связи для кварцевого маятникового акселерометра на отечественной элементной базе, отечественном микроконтроллере, при использовании электронных компонентов более

низкого уровня точности по сравнению с ранее использованными импортными ЭРИ, при сохранении точностных характеристик прибора за счет алгоритмической компенсации температурных погрешностей смещения нуля и масштабного коэффициента. Алгоритмическая компенсация температурных погрешностей кварцевых маятниковых акселерометров- аналогов акселерометра КХ67-041 применяется в авиационных системах управления, при этом температурные поправки вводятся в электронные устройства системы управления. Использование алгоритмической компенсации в цифровой обратной связи позволяет разгрузить бортовую систему управления, что является преимуществом предложенного технического решения.

- 2) Структура цифрового усилителя обратной связи известна. Для организации цифрового регулятора, обеспечивающего приведенную выше точность акселерометра, необходимы аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с малыми токами утечки и достаточной разрядностью. Необходимы ЦАП с разрядностью не менее 16.

Поскольку решалась задача построения цифровой обратной связи с использованием только отечественной элементной базы, то обеспечение необходимой точности оказалось возможным только при условии применения широтно-импульсного модулятора (ШИМ) для формирования управляющего воздействия в датчик момента чувствительного элемента акселерометра в соответствии выходом цифрового регулятора.

Разработка ШИМ- преобразователя с обеспечением компенсации неидеальностей формы импульсов ШИМ, их переднего и заднего фронтов, величины и формы переходных процессов, с обеспечением жестких требований к стабильности величины тока во время рабочего импульса стала возможной только на базе разработки и внедрения патентов [Ш-48-50].

В соответствии с техническим решением, изложенным в патентах, формируется система дополнительных импульсов положительной и отрицательной полярности, равной длительности, рассчитанной определенным образом, присоединяемых к рабочим импульсам и разделенных защитной паузой, также расчетной величины. Это позволило обеспечить выполнение основного требования ШИМ-преобразования: пропорциональности среднего значения тока за период T_0 ШИМ длительности рабочего импульса, что обеспечило постоянство коэффициента преобразования, т. е. линейность масштабного коэффициента во всем диапазоне измерений.

- 3) Цифровая обратная связь для кварцевого маятникового акселерометра с диапазоном измерения $\pm 10g$ прошла с положительными результатами все виды отработочных испытаний в модернизированном приборе БИЛУ. Модернизированный прибор прошел летные испытания в рамках беспилотного пуска космического корабля «Союз-МС» № 743. При этом, после летных испытаний, изменение масштабного коэффициента всех шести измерительных каналов по сравнению со значениями, определенными при изготовлении прибора, не превысило $\pm 0,002\%$.

- 4) Разработанные схемные решения цифровой обратной связи и программное обеспечение апробированы и для акселерометров с диапазоном измерения до $\pm 50g$.

При этом, выявлена возможность создания нового образца отечественного акселерометра, обладающего рядом технических преимуществ по сравнению с существующими акселерометрами. Эти преимущества:

1. В одном конструктиве изготавливается акселерометр, у которого путем перепрограммирования может быть изменен диапазон измеряемых линейных ускорений, полоса пропускания. Программы могут быть прошиты в микроконтроллере, модификации изготавливаемых приборов отличаются только прошитым программным обеспечением и нагрузочным резистором (либо системой переключателей, формирующих необходимое значение выходного сопротивления), устанавливаемым снаружи.
2. В состав акселерометра, помимо чувствительного элемента, входят в миниатюризированном исполнении цифровой усилитель обратной связи и вторичный

источник питания, обеспечивающий формирование всех необходимых напряжений из бортового напряжения 27 В.

3. Обеспечивается повышение виброустойчивости акселерометра за счет оптимизации выбора жесткости цифровой обратной связи.
4. Обеспечивается компенсация нелинейности масштабного коэффициента в диапазоне от ± 20 до ± 50 g, обусловленная погрешностью от разбалансировки, исследованная профессором С.Ф. Коноваловым.
5. Разработан и экспериментально проверен метод компенсации нелинейности, защищенный патентом [II - 49, 50].

Именно эти преимущества и определяют качественно новый тип акселерометра с цифровой обратной связью и новыми функциональными возможностями, т.е. позволяют сделать акселерометр с ЦУОС широкодиапазонным и универсальным прибором, годным для использования в различных объектах управления: в авиационных, морских системах управления, в системах управления высокоманевренными объектами, а также в системах управления испытательным оборудованием.

I. Список научных работ с использованием акселерометра с аналоговой системой управления.

1. *Андрейченко К.П., Андрейченко Д.К., Калихман Д.М.* Температурная погрешность кварцевого акселерометра // Гироскопия и навигация, № 2, 1999. С. 18–30.
2. Патент 2161384 РФ. С1 7 Н 05 К 7/20, G 05 D 23/02, приоритет от 13.05.1999. Устройство для температурной стабилизации электронного оборудования / *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Бранец В.Н., Бажанов Ю.А. и др.* // Б.И. 2001.
3. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Нахов С.Ф.* Блок измерителей линейных ускорений с прецизионными кварцевыми акселерометрами в качестве чувствительных элементов // 9 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 216–220.
4. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Полушкин А.В., Нахов С.Ф.* Проблемы использования прецизионных кварцевых измерителей кажущихся ускорений в современных инерциальных навигационных системах управления // 11 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2004. С. 157–163.
5. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Ермаков Р.В., Акмаев А.А., Полушкин А.В., Нахов С.Ф.* Кварцевый маятниковый акселерометр линейных ускорений с модулем алгоритмической компенсации температурной зависимости его параметров // 12 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 236–241.
6. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Калдымов Н.А., Полушкин А.В., Нахов С.Ф.* Методика и устройства для экспериментального определения динамических характеристик акселерометров линейных ускорений // 12 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С. 242–244.
7. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Полушкин А.В., Нахов С.Ф., Бранец В.М., Рыжков В.Н., Дибров Д.Н.* Методика аттестации блока измерения линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности шести кварцевых маятниковых акселерометров и методика аттестации рабочих мест для контроля блока и акселерометров // 13 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 226–232.

8. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Полушкин А.В., Нахов С.Ф., Бранец В.М., Рыжков В.Н., Дибров Д.Н.* Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения – прибор БИЛУ КХ69-042 для СУ спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» // 13 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 253–263.
9. Патент 2528119 РФ от 10.09.2014. Заявка № 2012156732 от 26.12.12. Термоинвариантный измеритель линейного ускорения / *Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Поздняков В.М., Чурилин Ю.С., Рыжков В.С., Самитов Р.М.* // Б.И. № 25, 2014.

II. Список научных работ по разработке гироскопических приборов и систем на их основе с цифровым управлением.

Доклады на Международной конференции по интегрированным навигационным системам (г. Санкт - Петербург)

1. *Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В., Ермаков Р.В., Нахов С.Ф.* Возможность построения миниатюрных блоков измерителей угловых скоростей повышенной надежности для космических объектов на базе поплавковых ДУС с использованием современной элементной базы // Сборник материалов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 29–37.
2. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Нахов С.Ф., Чеботаревский В.Ю.* Применение микропроцессоров в схемотехнических решениях прецизионных кварцевых маятниковых акселерометров // Сборник материалов XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 173–176.
3. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф.* Прецизионный стенд с гироскопическим датчиком угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента с цифровой системой управления // Сборник материалов XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 169–172.
4. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф.* Прецизионный широкодиапазонный стенд с инерциальными чувствительными элементами и цифровой системой управления // Сборник материалов XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С. 48–53.
5. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф., Измайлов Е.А., Молчанов А.В., Чиркин М.В.* Универсальный стенд с цифровой системой управления для контроля измерителей угловой скорости различного принципа действия // Сборник материалов XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 147–154.
6. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф., Никифоров В.М.* Широкодиапазонный универсальный стенд с цифровой системой управления для контроля гироскопических приборов // Сборник материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2011. С. 122–124.
7. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф.* Трёхосный имитационно-калибровочный универсальный стенд с цифровой системой управления для

- контроля гироскопических приборов // Сборник материалов XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 91–94.
8. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А., Туркин В.А., Нахов С.Ф., Никифоров В.М., Чайковский М.М.* Принципы разработки цифровых помехоустойчивых регуляторов каналов измерения угловой скорости и кажущегося ускорения в современных БИНС и программно-математического обеспечения для их контроля // Сборник материалов XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 285–291.
 9. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Поздняков В.М., Нахов С.Ф., Межирицкий Е.Л., Сапожников А.И., Смирнов Е.С.* Термоинвариантные измерители угловой скорости и кажущегося ускорения // Сборник материалов XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 203–219.
 10. *Калихман Д.М., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Сапожников А.И., Смирнов Е.С.* Виброустойчивый маятниковый акселерометр линейных ускорений с цифровой обратной связью // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 368–376.
 11. *Калихман Д.М., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Ермаков Р.В.* Результаты экспериментальной отработки термоинвариантного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и перепрограммируемым диапазоном измерения // Сборник материалов XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 139–157.
 12. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Нахов С.Ф., Ермаков Р.В., Туркин В.А., Садомцев Ю.В., Львов А.А., Янковский А.А., Кривцов Е.П.* Основы разработки комплексного цифрового управления прецизионными стендами с инерциальными чувствительными элементами по сигналам с измерителей угловой скорости, кажущегося ускорения и оптического датчика угла // Сборник материалов XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 302–307.
 13. *Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф.* Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента измерителей угловых скоростей и линейных ускорений компенсационного типа с цифровой обратной связью и широтно-импульсным управлением током датчика момента // Сборник материалов XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 299–306.
 14. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Туркин В.А., Акмаев А.А., Николаенко А.Ю., Гнусарев Д.С.* Комплексный подход разработки цифровых регуляторов для инерциальных чувствительных элементов современных БИНС и программно-математического обеспечения для их контроля // Сборник материалов XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 328–330.
 15. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Нахов С.Ф.* Способ повышения стабильности масштабного коэффициента маятникового акселерометра с цифровой обратной связью // Сборник материалов XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 331–333.
 16. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Крайнов А.П., Янковский А.А., Кривцов Е.П., Ермаков Р.В.* Пути расширения диапазона измерения и повышения точностных

- характеристик поворотных стендов с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов // Сборник материалов XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 334–339.
17. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Николаенко А. Ю., Самитов Р.М., Кожевников В.Е.* Шестиосный блок измерителей кажущихся ускорений на основе прецизионного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью для систем управления космическими кораблями «Союз-МС» и «Прогресс-МС» // Сборник материалов XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 225–231.
 18. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Гнусарёв Д.С., Никифоров В.М., Кривцов Е.П., Янковский А.А.* Разработка цифровых регуляторов для систем управления гироскопическими приборами и метрологическими установками на их основе с применением современных методов синтеза с целью улучшения точностных и динамических характеристик // Сборник материалов XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 274–278.
 19. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Львов А.А., Ермаков Р.В., Кривцов Е.П., Янковский А.А.* Применение метода максимального правдоподобия при комплексировании информации с первичных измерителей в прецизионном поворотном стенде с инерциальными чувствительными элементами и цифровой системой управления для улучшения его точностных характеристик // Сборник материалов XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2020.
 20. *Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Лутченко А.В., Нахов С.Ф., Кожевников В.Е., Самитов Р.М.* Результаты лётных испытаний шестиосного блока измерителей кажущегося ускорения на основе прецизионного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью в составе космического корабля «Союз МС-14» // Сборник материалов XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2020.

Доклады на других международных конференциях

21. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Полушкин А.В., Нахов С.Ф.* Принципы проектирования прецизионных стендов с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов с аналоговой и цифровой системами управления // Международная научно-техническая конференция «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами». М.: Союз НИО, 2008. С. 143–154.
22. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В.* Прецизионный широкодиапазонный кварцевый маятниковый акселерометр // XXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях». Саратов: СГТУ, 2011. С. 8–12.
23. *Гребенников В.И., Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Садомцев Ю.В., Скоробогатов В.В.* Результаты разработки акселерометра с цифровой обратной связью // Сборник трудов II Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». Саратов: Райт-Экспо, 2012. С. 9–13.
24. *Калихман Д.М., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В.* Цифровые системы управления прецизионными стендами с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов // Сборник трудов III международной научной

- конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». Саратов: Райт-Экспо, 2013. Т. 1. С. 230–246.
25. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Поздняков В.М., Скоробогатов В.В., Солозобов В.И., Туркин В.А., Рачков А.Г., Нахов С.Ф.* Разработка модернизированного прибора ПВ-301М // Международная научно-техническая конференция РАН «Системы и комплексы автоматического управления летательных аппаратов», посвящённая 105-летию со дня рождения академика Н.А. Пилюгина. М: 2013.
 26. *Калихман Д.М., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Гнусарев Д.С., Чибирев А.В.* Виброустойчивость кварцевых маятниковых акселерометров с цифровой обратной связью // Сборник трудов IV Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015), посвящённой 85-летию СГТУ им. Гагарина Ю.А., т. 1. Саратов.: Изд-во СГТУ, 2015. С. 5-15.
 27. *Калихман Д.М., Туркин В.А., Платоненко Ю.А., Никифоров В.М., Садомцев Ю.В., Рязанцев А.С., Афанасьев М.Ю.* Основы разработки цифровых регуляторов и программно-математического обеспечения для современных беспилотных инерциальных навигационных систем в условиях действия помех // Сборник трудов IV Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015), посвящённой 85-летию СГТУ им. Гагарина Ю.А., т. 1. Саратов.: Изд-во СГТУ, 2015. С. 15–24.
 28. *KalihanDmitriy M., L'vov Alexey A., Ermakov Roman V., SokolovDmitriy N.* Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information from the Sensors of Different Physical Nature // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus) February 1-3, 2017.
 29. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Кривцов Е.П., Янковский А.А., Ермаков Р.В., Львов А.А.* Принципы построения стендов с инерциальными чувствительными элементами для высокоточного измерения угловых скоростей // Сборник аннотаций докладов международной научно-практической конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений». СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2017. С. 145–149.
 30. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В.* Применение широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью в качестве инерциального чувствительного элемента в высокоточных установках для задания угловых скоростей // Сборник аннотаций докладов международной научно-практической конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений». СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2017. С. 163–166.
 31. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Гнусарёв Д.С., Короткова Е.В., Скоробогатов В.В.* Оптимальный фильтр для кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи. // Сборник трудов VI Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017). Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. С. 62–68.
 32. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Ермаков Р.В., Скоробогатов В.В.* Прецизионный стенд для «самоконтроля» измерителей угловой скорости с цифровой адаптивной системой управления // Сборник трудов VI Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017). Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. С. 69–75.
 33. *Калихман Д.М., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю.* Компенсация температурных погрешностей измерителей угловой скорости с усилителем обратной связи // Сборник трудов VI Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017). Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. С. 107–113.

34. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Гнусарёв Д.С.* Перспективы развития БИНС на современных типах гироскопов и акселерометров в ракетно-космической технике // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (УОПИ-2018). Саратов: Изд-во СГТУ, 2019. С. 29–53.
35. *Калихман Д.М., Николаенко А.Ю., Скоробогатов В.В., Гнусарёв Д.С., Шишкин Д.С.* Методика повышения виброустойчивости акселерометров: от математического моделирования к эксперименту // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (УОПИ-2018). Саратов: Изд-во СГТУ, 2019. С. 85–95.
36. *Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Янковский А.А.* Разработка прецизионных метрологических установок с цифровыми системами управления для испытания приборов навигации // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (УОПИ-2018). Саратов: Изд-во СГТУ, 2019. С. 96–107.

Доклады на всероссийских конференциях и конкурсах

37. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А.* Гироскопические мехатронные системы // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация и управление». СПб.: 2010. С. 212–216.
38. *Депутатова Е.А., Гнусарев Д.С.* Прецизионные поворотные стенды с цифровыми системами управления для контроля гироскопических приборов // Аннотации конкурсных работ 10-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». М.: МАИ, 2018. С. 118–120.
39. *Гнусарев Д.С., Депутатова Е.А.* Исследование влияния методов синтеза дискретных регуляторов на динамические характеристики кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 16–17.
40. *Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю.* Прецизионный кварцевый маятниковый акселерометр с цифровой системой управления и настраиваемым диапазоном измерения // Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: Сборник аннотаций конкурсных работ. М: МАИ, 2018. С. 163–165.
41. *Николаенко А.Ю., Гнусарев Д.С., Депутатова Е.А.* Прецизионный акселерометр с цифровой системой управления для объектов различного назначения // Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи»: Материалы. СПб: БГТУ «Военмех», Инфо-Да, 2019. С. 124–130.
42. *Гнусарев Д.С., Николаенко А.Ю.* Блок измерителей линейного ускорения с цифровой системой управления для объектов ракетно-космического назначения // Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: Сборник аннотаций конкурсных работ. М: МАИ, 2019. С. 104–105.

Патенты

43. Патент RU № 2339912 С1 МПК G01С 25/00 (2006.01) , приоритет от 13.02. 2007. Стенд для контроля измерителей угловой скорости/ Калихман Д.М., Калихман Л.Я.,

- Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф. // Опубликовано 27.11.2008 Б.И. № 33.
44. Патент RU № 2378618 , приоритет от 18.02.2008, Широкодиапазонный стенд для контроля измерителей угловой скорости / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф. Зарегистрирован в Государственном реестре патентов Российской Федерации 10 января 2010 г. // Б.И. №1 2010.
 45. Патент RU № 2403538, приоритет от 22.05.2009 г. Универсальный стенд для контроля прецизионных гироскопических измерителей угловой скорости / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Ермаков Р.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф. , Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Зарегистрирован в Государственном реестре патентов Российской Федерации 10 ноября 2010 г. // Б.И. №31 2010.
 46. Патент № 2494345, заявка № 2012101374, приоритет от 16.01.2012. Универсальный широкодиапазонный стенд для контроля измерителей угловой скорости. / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф., Никифоров В.М., Сапожников А.И., Межирицкий Е.Л. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 27.09.2013 г. // Б.И. 2013
 47. Патент № 2548377 от 20.04.2015. Заявка № 2013152167 приоритет от 25.11.13 Безобогревной термоинвариантный электромеханический поплавковый измеритель угловой скорости. / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Нахов С.Ф., Поздняков В.М., Скоробогатов В.В., Сапожников А.И., Межирицкий Е.Л., Морозов В.В., Журавенков С.Н. // Б.И. № 11 2015.
 48. Патент RU № 2615221 от 04.04.2017. Заявка № 2015116808. Приоритет от 30.04.2015 Способ обеспечения виброустойчивости маятникового акселерометра линейных ускорений с цифровой обратной связью и виброустойчивый маятниковый акселерометр. / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Смирнов Е.С. // Б.И. № 10 2017.
 49. Патент № 2627970 от 14.08.2017 г. Заявка № 2016144606. Приоритет от 14.11. 16 г. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового широкодиапазонного акселерометра компенсационного типа. / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф. // Б.И. № 23 2017.
 50. Патент № 2626071 от 21.07.2017 г. Заявка № 2016122097. Приоритет от 03.06. 16 г. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового акселерометра компенсационного типа. / Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф. , Кожевников В.Е., Самитов Р.М. // Б.И. № 21 2017.

Статьи в научно-технических журналах из списка ВАК

51. Калихман Д.М., Садомцев Ю.В., Полушкин А.В., Депутатова Е.А., Скрипкин А.А. Прецизионный стенд с датчиком угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента и двухконтурной цифровой системой управления // Авиационная промышленность, №1, 2010. С. 43–49.
52. Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. Часть 1. Применение поплавкового измерителя угловой скорости // Известия РАН. Теория и системы управления, №1. 2011. С. 120–132.
53. Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. Часть 2. Применение поплавкового измерителя угловой скорости и маятниковых акселерометров // Известия РАН. Теория и системы управления, №2. 2011. С. 131–146.

54. Калихман Д.М., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А., Никифоров В.М. Прецизионные поворотные стенды нового поколения с инерциальными чувствительными элементами и цифровым управлением // Известия РАН. Теория и системы управления, № 2. 2014. С. 130–146.
55. Калихман Д.М., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф. Обобщенная концепция построения цифровых систем управления стендами с инерциальными чувствительными элементами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 10 / под научной ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 91–103.
56. Калихман Д.М., Скоробогатов В.В., Калихман Л.Я., Нахов С.Ф., Поздняков В.М., Гребенников В.И., Депутатова Е.А. Проблемы разработки современных блоков электромеханических измерителей угловой скорости и кварцевых маятниковых акселерометров для объектов ракетно-космической техники. История и перспективы развития // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 10 / под научной ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 311–325.
57. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Лутченко А.В. Результаты лабораторно-отрабочных испытаний измерительных каналов модернизируемого измерителя линейных ускорений для спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» на основе использования цифровой обратной связи в кварцевых маятниковых акселерометрах // Труды ФГУП НПЦАП. Системы и приборы управления, № 3. 2017. С. 32–40.
58. Калихман Д.М., Скоробогатов В.В. Перспективы развития кварцевых маятниковых акселерометров в БИНС авиационного и космического применения // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами, № 20. 2018. С. 21–50.
59. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Лутченко А.В., Гнусарев Д.С. Безобогревные способы обеспечения термоинвариантности смещения нулевого сигнала и масштабного коэффициента кварцевого маятникового акселерометра с аналоговой и цифровой обратной связью // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, №2 (44). 2018. С. 42–46.
60. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф. Безобогревные способы обеспечения термоинвариантности масштабного коэффициента и динамических характеристик поплавковых датчиков угловых скоростей с аналоговой и цифровой обратной связью // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, №2 (44). 2018. С. 49–53.
61. Калихман Д.М., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А. Методика построения цифровой обратной связи на отечественных ЭРИ для первичных инерциальных измерителей угловых скоростей и линейных ускорений современных БИНС // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, №2 (44). 2018. С. 46–49.
62. Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Гнусарёв Д.С. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики. СПб.: т. 18, № 6. 2018. С. 1091–1098.
63. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Гнусарёв Д.С. Шестиосный блок акселерометров для КК «Союз» и «Прогресс». История развития: от аналоговой системы управления измерительным каналом к цифровой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 83–106.
64. Калихман Д.М., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А., Николаенко А.Ю., Гнусарёв Д.С., Елизарова И.А. Кварцевый маятниковый акселерометр с цифровой обратной связью как система автоматического управления: результаты синтеза регуляторов и программно-математического обеспечения. Перспективы дальнейшего развития // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами, выпуск 26. 2019. С. 2–37.

65. *Гнусарев Д.С., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А.* Математическое моделирование чувствительных элементов из кварцевого стекла для измерителей угловых скоростей и кажущихся ускорений на примере волнового твердотельного гироскопа и маятникового акселерометра для современных БИНС // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т 19. № 3. С. 531–537.
66. *Депутатова Е.А.* Применение кварцевых маятниковых акселерометров с цифровой системой управления в поворотных стендах для контроля гироскопических приборов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8 / Под научной ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 317–326.
67. *Николаенко А.Ю., Скоробогатов В.В.* Способы повышения виброустойчивости кварцевого маятникового акселерометра при использовании цифрового усилителя обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 883–891.

Находятся в стадии опубликования

68. *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В.* Маятниковый акселерометр с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями // Известия РАН. Теория и системы управления, 2020.

Авторефераты кандидатских диссертаций.

69. *Депутатова Е.А.* Широкодиапазонные поворотные стенды с цифровыми системами управления и навигационными приборами в качестве чувствительных элементов для контроля измерителей угловой скорости. – Саратов, Изд-во СГТУ, 2012 г.
70. *Скоробогатов В.В.* Основы разработки безобогревных измерителей угловых скоростей и кажущихся ускорений для систем управления ракетно – космическими объектами. - Саратов, Изд-во СГТУ, 2018 г.