

Обоснование применения помехоподавляющей схемы бесконтактного датчика для измерения дефектов геометрии

К. Епифанцев, к. т. н.¹

УДК 006.1 | ВАК 2.2.4

Создан прототип бесконтактного емкостного датчика для измерения дефектов формы для импортозамещения контактного щупа австрийского производства. Приведены результаты теоретического обоснования, исследований технических и методических решений по созданию оптических цифровых приборов, которые могут быть использованы для измерения дефектов формы и шероховатости. Емкостной датчик, имеющий предварительную систему преобразования, был использован как альтернатива имеющемуся контактному щупу на кругломере японского производства, поставка контактных щупов на который осложняется санкциями.

Контактные датчики широко применяются в приборах для измерения дефектов геометрии, шероховатости, контура поверхности: кругломерах, профилометрах-профилографах и контурографах. В приборах данного вида используются твердосплавные щупы для анализа контура детали, дефектов обработки, таких как бочкообразность, конусность, дефект плоскостности и др. Но с течением времени операторы данных машин начинают испытывать ряд сложностей при их обслуживании. Во-первых, контактные щупы для вышеупомянутых приборов иностранного производства, а значит, их поставки могут быть затруднены. Во-вторых, контактные щупы изнашиваются, скалываются, истираются, что также негативно сказывается на результатах измерений, процессах калибровки приборов. В каждом приборе при этом заложена программа компенсационных коэффициентов, которая превентивно компенсирует дефект сколотого щупа, однако в некоторых случаях приходится останавливать работу прибора по причине невозможности завершить калибровку. Более того, очень большие поправочные коэффициенты компенсации (при дефектном щупе) могут провоцировать большие погрешности измерения.

Данная исследовательская работа имеет большое значение для импортозамещения датчиков, использующихся

в приборах для измерения дефектов геометрии, которые прекратили производиться в России с 1996 года. До недавнего времени эти приборы массово закупались в Японии, у компании Mitutojo, однако в связи с санкциями доставка комплектующих для данных приборов в настоящее время ограничена, приборы не завозятся в Россию. В связи с этим, была предпринята попытка создать прототипы-аналоги измерительных датчиков и преобразователей кругломеров, что позволит производить аналогичные приборы на территории РФ.

Процесс измерения дефектов формы производится с помощью кругломеров (рис. 1), в основе которых лежит воздушный подшипник вращения, работающий от компрессора и вращающий координатный стол и контактный щуп, который производит сканирование детали в определенных сечениях для выявления дефектов геометрии.

Современные технологии создания высокоскоростных движителей стремятся минимизировать вибрационные нагрузки при вращении двигателя для увеличения КПД установки и увеличения срока службы подшипниковых и кинематических пар.

Именно поэтому развитие измерительных приборов данного класса отечественной разработки является главной задачей отечественного приборостроения. Алгоритм работы программного обеспечения кругломера имеет ряд фильтров, механических компенсаторов, позволяющих достигнуть субмикронной точности при измерениях для определения микродефектов геометрии, которые впоследствии могут приводить к развитию вибрационных нагрузок.

Цель работы – создать прототип бесконтактного емкостного датчика для измерения дефектов формы

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия. Кафедра метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности, доцент, e-mail: epifancew@gmail.com.

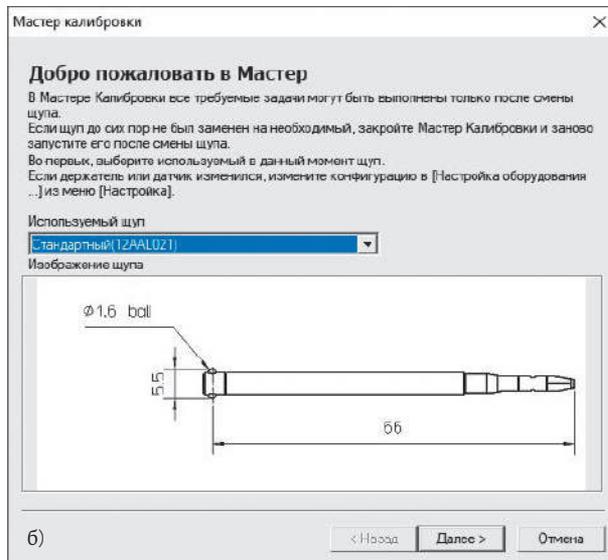


Рис. 1. Кругломер Roundtest (а) и стандартный щуп кругломера (б)

для импортозамещения контактного щупа австрийского производства.

В ходе исследования были поставлены задачи:

- испытать индуктивный датчик с латунным щупом на детали при отдалении датчика от детали и приближении к ней (при этом использовать частотомер);
- испытать индуктивный датчик с латунным щупом на детали при прохождении датчика параллельно поверхности детали (использовать осциллограф);
- испытать индуктивный датчик с латунным щупом на детали при отдалении датчика от детали и приближении к ней (использовать осциллограф);
- оценить погрешность измерения, рассмотреть возможность измерения дефектов геометрии детали из марки стали Ст45.

ОБЗОР АНАЛОГИЧНЫХ ЕМКОСТНЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ

В процессе разработки датчика собственной оригинальной конструкции были проанализированы аналогичные типы датчиков для бесконтактного контроля геометрии деталей. В работах [1–5] отмечена зависимость между емкостью и расстоянием наблюдаемого объекта, представленная на рис. 2. Анализируя график, можно сделать вывод, что есть некоторый выход датчика на определенный режим (стабилизацию из-за сопротивления датчика шумам), сопровождающийся резким увеличением емкости при минимальном расстоянии между наблюдаемым объектом и второй пластиной конденсатора (вторая пластина конденсатора – исследуемый объект). Можно отметить, что точка координат C_m и d_m на графике является точкой экстремума функции, при больших значениях d_m

начинается экспоненциальный подъем графика и плавный переход в ровную линию, что свидетельствует о некотором расстоянии, при котором датчик перестает улавливать приближение объекта.

Можно отметить, что при создании прибора для анализа биения (например, датчика для кругломера или контурографа отечественного производства) не стоит задача максимально удалять датчик от объекта измерения – расстояния от нулевой координаты до точки пересечения координат C_m и d_m вполне достаточно. При этом,

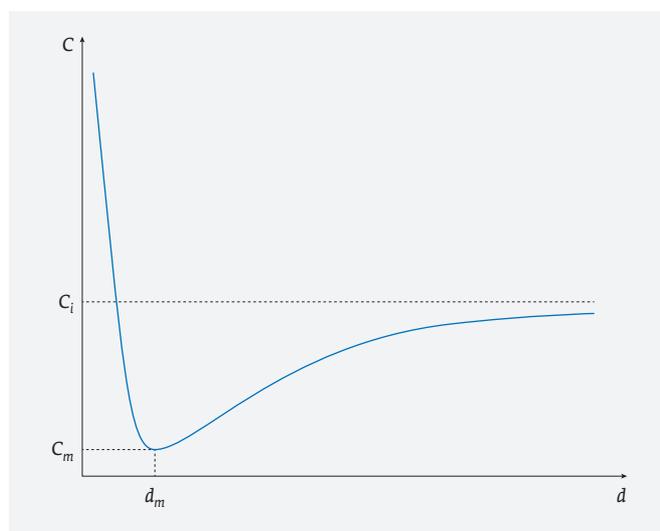


Рис. 2. Зависимость емкости чувствительного элемента датчика от расстояния между наблюдаемым объектом и поверхностью датчика

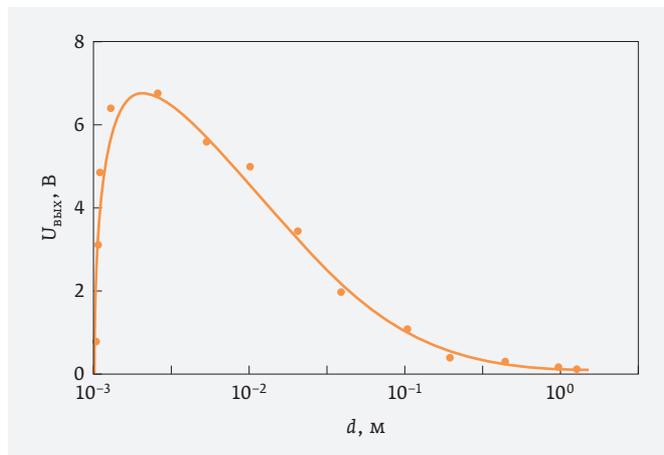


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала датчика от расстояния до металлической детали

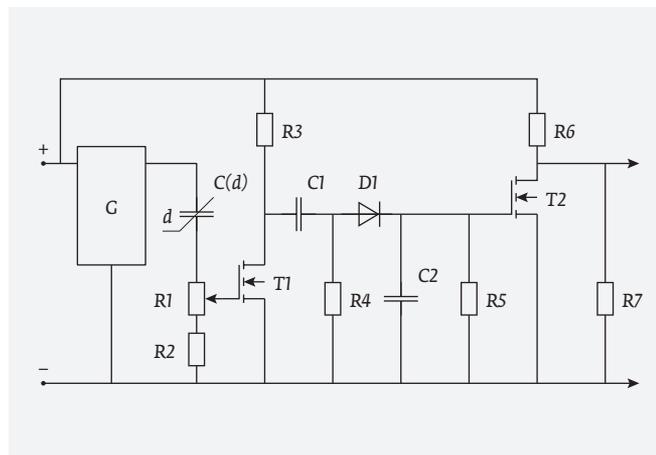


Рис. 4. Схемотехническая реализация планарного емкостного датчика

как отмечают авторы [6, 7], участок от 0 до d_m – «короткодействующий» (в изготовленном макете – около 1 мм), а участок от d_m до бесконечности – «дальнодействующий» – от 1 м и более. Возрастание емкости при увеличении расстояния между пластинами (объектом и щупом) подтверждено в трудах [6–8], в которых рассматривается вопрос разработки датчика индуктивности с характеристиками, представленными на рис. 3.

Схема реализации планарного емкостного датчика приведена на рис. 4. В этой схеме авторами реализован следующий принцип: от источника питания (12 В) генератора ВЧ-импульсов (его частота 280 кГц, от микросхемы NE 555) к выходу микросхемы подключена цепочка последовательно соединенных пластин – электродов датчика и потенциометра на базе резисторов R1 и R2.

В разработке нового емкостного датчика, сделанной с учетом вышеприведенных прототипов, был использован компонентный состав и генератор 8 МГц. Из рассмотренных выше разработок была интегрирована также и система шумоподавления, которая сократила процесс стабилизации при измерении частоты.

В исследовании [9, 10] рассматривается вопрос использования блока коррекции емкостного сравнения емкостных датчиков как одного из блоков для повышения надежности выборки. Как видно из графика на рис. 4, наблюдается значительное количество шумов. Предложена схема подавления шумов [10] – рис. 5.

При приближении контролируемых элементов к рабочему электроду изменяется пространственная картина распределения электромагнитного поля, что ведет

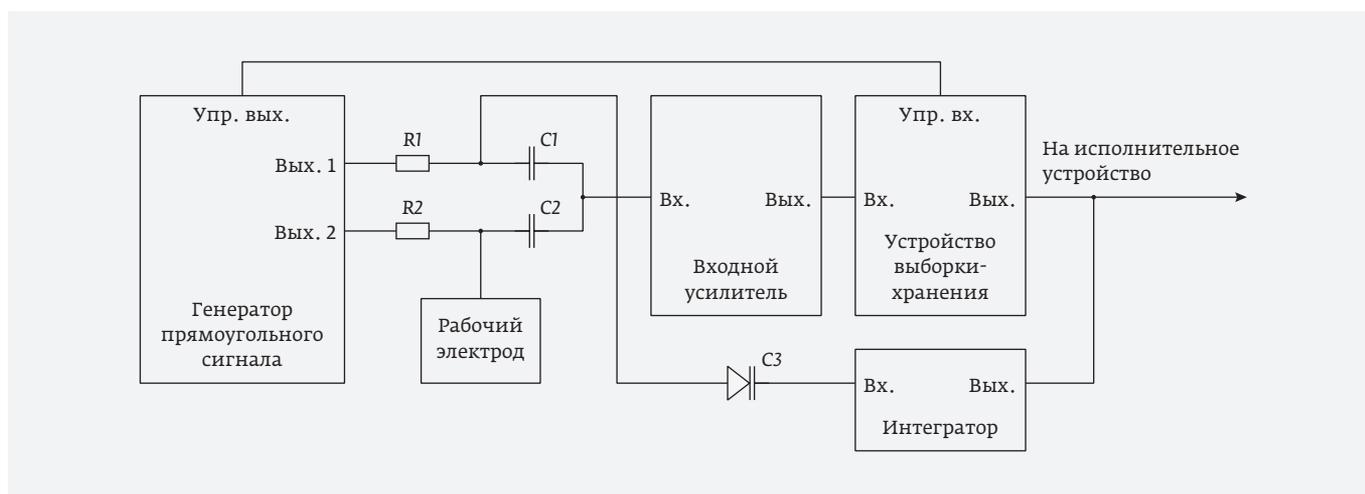


Рис. 5. Адаптивная измерительная система

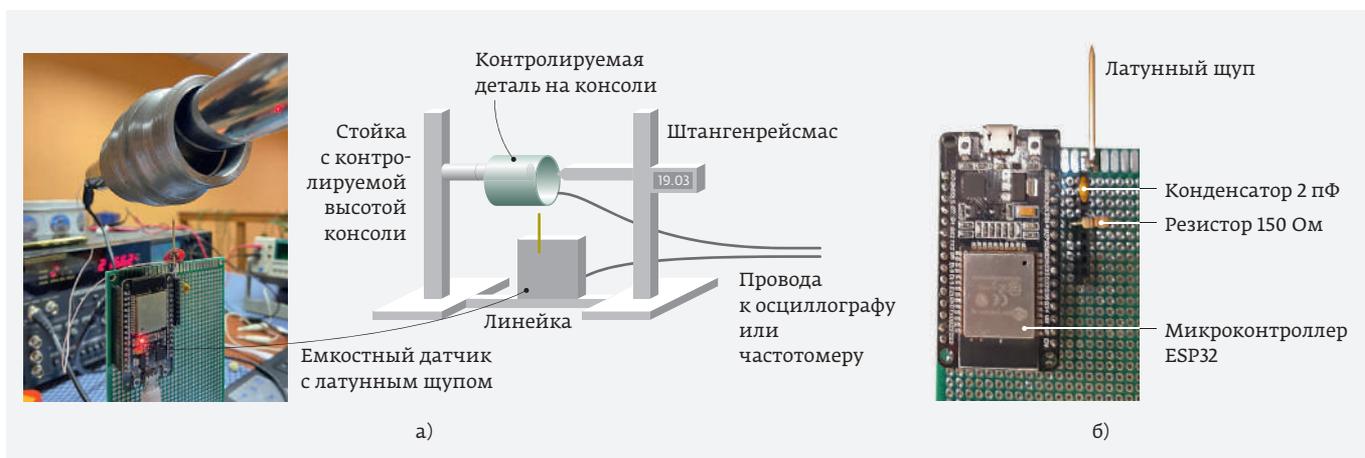


Рис. 6. Экспериментальная установка (а); прототип датчика (б)

к изменению емкости рабочего электрода. Однако, при изменении влажности, также может произойти изменение емкости, что может привести к погрешностям. Чтобы исключить или уменьшить эти погрешности, необходимо применить блок коррекции [9–11].

Использование цепи емкостной коррекции изменения емкости рабочего электрода также вызывает изменение напряжения на выходе устройства выборки-хранения. Медленное изменение емкости рабочего электрода обычно происходит при изменении состояния погодных условий. В этом случае напряжение на выходе устройства выборки-хранения изменяется постепенно и поступает на электрически изменяемую емкость через интегратор, который обеспечивает необходимую задержку корректировки емкости. Использование интегратора необходимо для обеспечения включения сигнализации при резких изменениях емкости рабочего электрода.

НОВЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК

В процессе разработки бесконтактного датчика для измерения дефекта формы была применена аналогичная схема создания данных преобразователей на основе емкостного датчика в виде планарного конденсатора [1–3]. В качестве одной из пластин конденсатора была принята деталь из конструкционной стали, которая представляла собой тело вращения, полученное токарной обработкой. Вторая пластина планарного конденсатора – латунный щуп, соединенный с контроллером ESP-32 и кварцевым генератором, получающих питание, не превышающее 6 В, от USB-входа ноутбука, в котором находилась программа для контроллера. Экспериментальная установка и разработанный прототип датчика представлены на рис. 6.

В данном случае провод «–» пробника от частотомера Voltcraft был подключен к детали, положительный вывод – к латунному щупу. При этом возможно измерение

с отключенным основным питанием, так как питания, имеющегося в пробнике от частотомера, вполне хватает на измерение детали, однако в среднем показания на частотомере при этом меньше примерно в 100 раз. В разработанной экспериментальной установке применены частотомер MS9150 и осциллограф АК ИП (рис. 7).

Выявленная зависимость частоты от величины воздушного зазора при приближении латунного щупа к детали и, следовательно, при уменьшении воздушного зазора представлена на графике (рис. 8). Емкость конденсатора – 2 пФ. Все значения фиксировались вручную, приближение щупа к прибору фиксировалось штангенрейсмасом, который контролировал, в свою очередь,



Рис. 7. Осциллограф АК ИП и частотомер MS9150

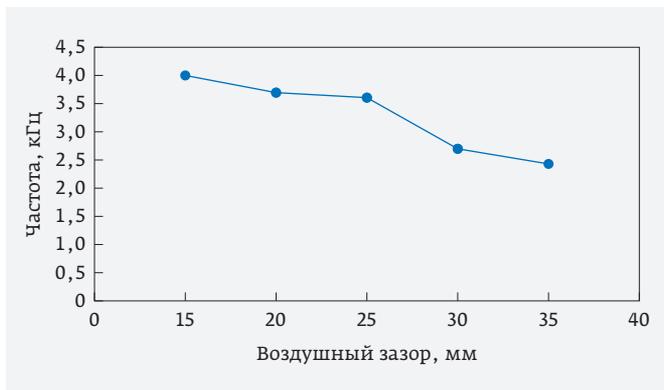


Рис. 8. Зависимость частоты от воздушного зазора при измерении детали на частотомере

положение металлической оси, на которой была зафиксирована деталь (см. рис. 6). При этом были замечены шумовые эффекты, которые требовали значительной стабилизации частоты (около 5 с) на одно измерение. При этом категорически исключается касание детали рукой, так как это вызывает мгновенное зашумление результата измерения.

Таким образом, было замечено, что при уменьшении воздушного зазора частота возрастает. Частотомер в дальнейшей серии экспериментов был заменен на осциллограф АК ИП с целью исследования осциллограмм. Результаты измерений зависимости воздушного зазора от частоты с помощью высокопроизводительного осциллографа АК ИП приведены в табл. 1.

В табл. 1 и на рис. 9 и 10 представлено сканирование детали бесконтактным емкостным щупом, которое проводится по принципу действия контурографа, контактный щуп которого проходит по всем точкам детали, описывая ее профиль. Данные измерения важны для измерения тех



Рис. 9. Расположение датчика под деталью

параметров, которые невозможно измерить ручным измерительным инструментом. Разработанный датчик при этом не царапает поверхность детали, находясь от нее на некотором удалении. Обобщенные результаты представлены на рис. 11.

В процессе прохождения щупа параллельно детали на одном расстоянии от нее (расстояние при этом было в диапазоне 10–18 мм) наблюдается профиль возрастающих, что частично соответствует профилю детали. Заход датчика на сканирование детали осуществлялся от резьбы (резьба была отправной точкой), далее – правее до самой границы детали по длине 80 мм. Однако четко го профиля, повторяемого щупом, пока не наблюдается,

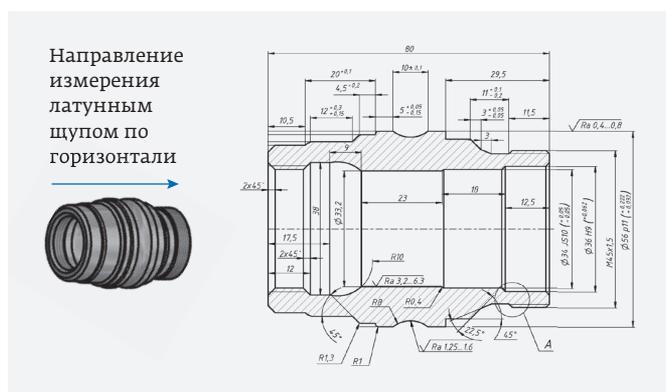
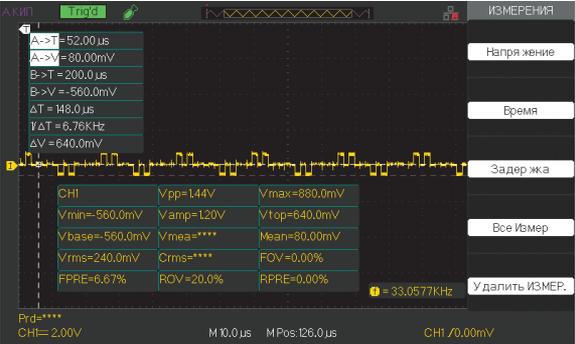
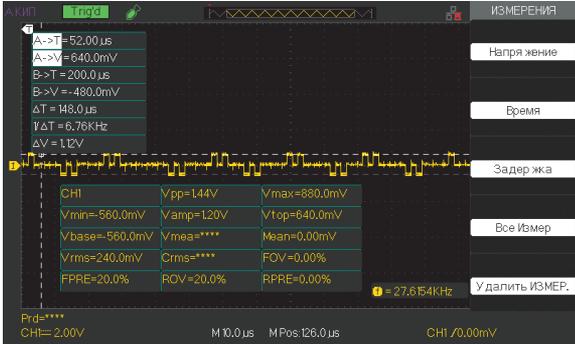


Рис. 10. Внешний вид детали и направление прохождения щупа под ней



Рис. 11. Обобщенные результаты эксперимента

Таблица 1. Результаты измерений на осциллографе АКИП

Осциллограмма	Расстояние от края детали до положения щупа под ней, мм	Осциллограмма	Расстояние от края детали до положения щупа под ней, мм
 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 80,00mV B->T = 200,0 μs B->V = -560,0mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 640,0mV</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 33,0577$KHz</p>	80	 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 640,0mV B->T = 200,0 μs B->V = -480,0mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 1,2V</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 27,6154$KHz</p>	28
 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 80,00mV B->T = 200,0 μs B->V = -560,0mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 640,0mV</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 29,8444$KHz</p>	67	 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 80,00mV B->T = 200,0 μs B->V = -480,0mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 560,0mV</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 26,1360$KHz</p>	15
 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 80,00mV B->T = 200,0 μs B->V = 80,00mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 0,00V</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 29,0596$KHz</p>	54	 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 640,0mV B->T = 200,0 μs B->V = 60,00mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 560,0mV</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 27,7994$KHz</p>	2
 <p>АКИП Triggd</p> <p>ИЗМЕРЕНИЯ</p> <p>A->T = 52,00 μs A->V = 80,00mV B->T = 200,0 μs B->V = -400,0mV ΔT = 148,0 μs $\gamma$$\Delta$T = 6,76KHz ΔV = 480,0mV</p> <p>Напря жение</p> <p>Время</p> <p>Задерж ка</p> <p>Все Измер</p> <p>Удалить ИЗМЕР.</p> <p>CHI = 2,00V</p> <p>M 10,0 μs MPos: 126,0 μs CHI /0,00mV</p> <p>$f = 28,2319$KHz</p>	41		

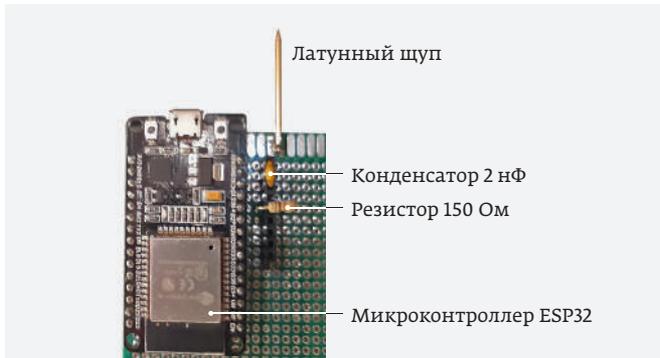


Рис. 12. Прототип с замененным конденсатором

причиной этому может быть ряд помех, которые возникли из-за случайного касания рукой оператора о деталь, вибрации датчика при перемещении по столу, что наводит на вывод о необходимости прецизионных направляющих, которые не имели бы в будущем подобных микровибраций.

Далее емкость была заменена на 2 нФ, а в цепь добавлен кварцевый генератор 40 МГц (рис. 12). Направление измерения латунным щупом по вертикали, приближение-удаление показано на рис. 13. Результаты представлены в виде осциллограмм, исследование началось с расстояния 150 мм до поверхности детали (табл. 2).

При приближении датчика к детали (рис. 14) частота увеличивается, особенно в зоне с 20 мм. Что свидетельствует о том, что оптимальное расстояние между датчиком и измеряемой деталью при текущей конструкции датчика – в диапазоне от 10 до 20 мм.

Таким образом, использование цепи емкостной коррекции и дополнительного блока сравнения при проектировании

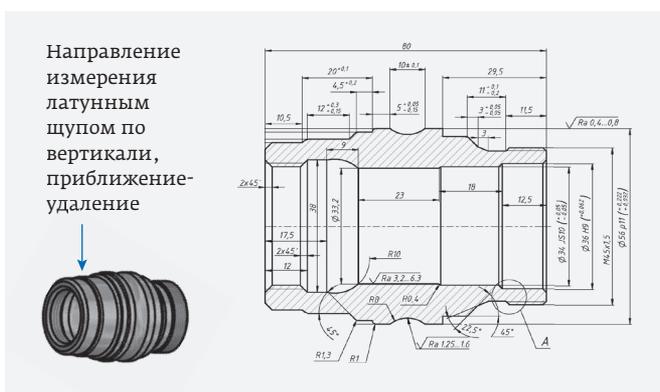


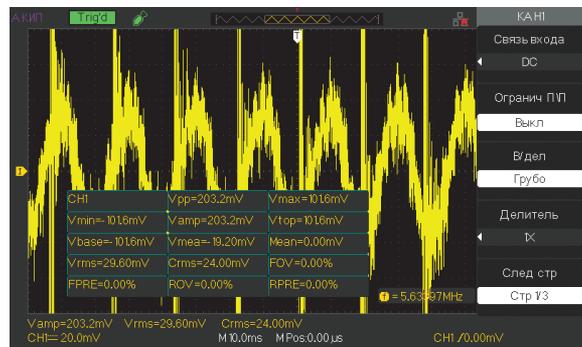
Рис. 13. Измеряемая деталь и направление перемещения щупа

Таблица 2. Результаты измерений на осциллографе АКИП

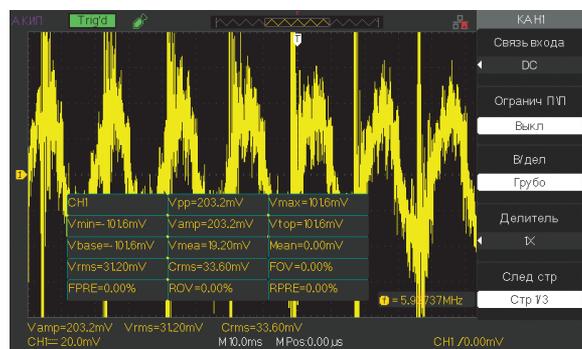
Осциллограмма	Расстояние от детали до щупа по вертикали, мм
	150
	133,5
	117
	100,5



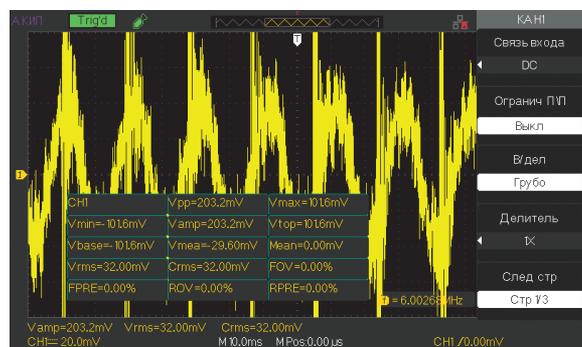
150



133,5



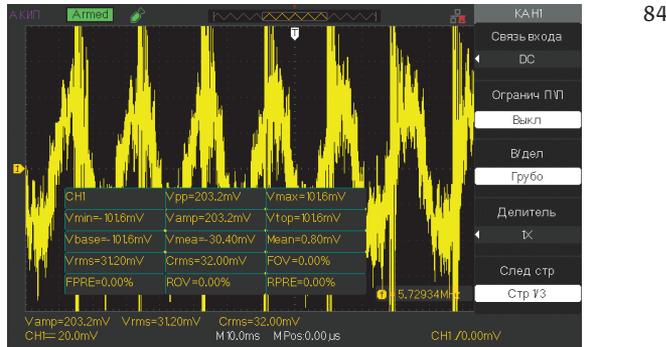
117



100,5

Таблица 2. Продолжение

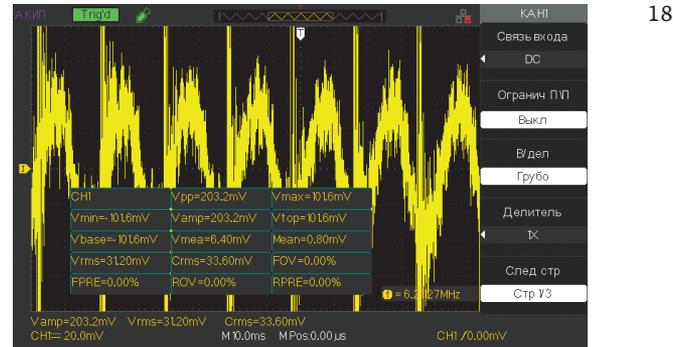
Осциллограмма Расстояние от детали до щупа по вертикали, мм



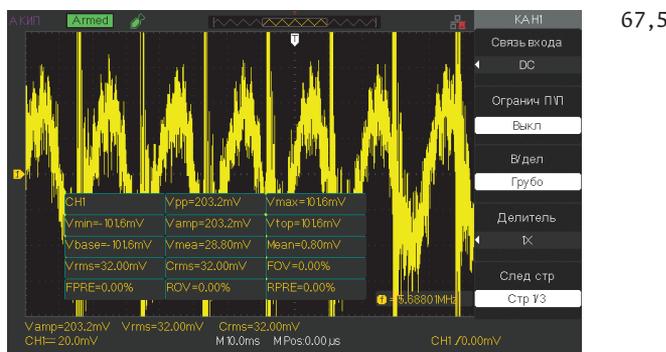
84

Таблица 2. Продолжение

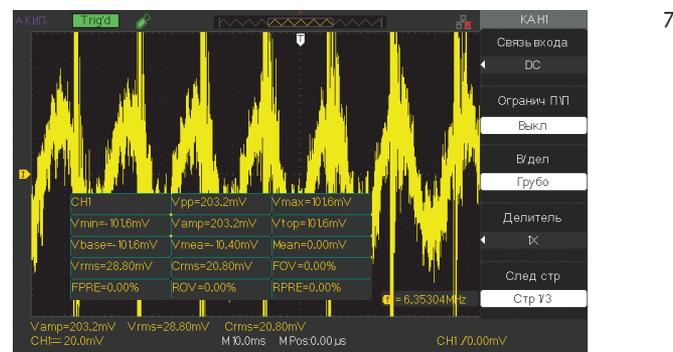
Осциллограмма Расстояние от детали до щупа по вертикали, мм



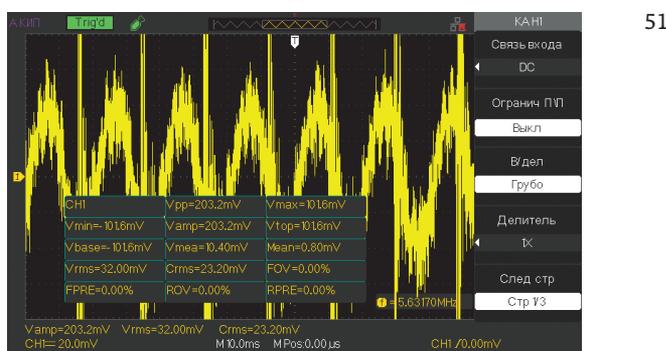
18



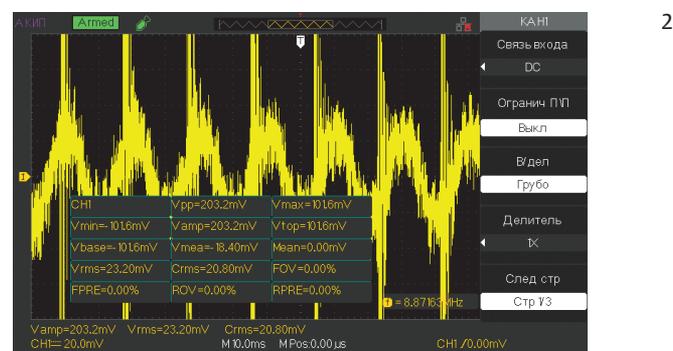
67,5



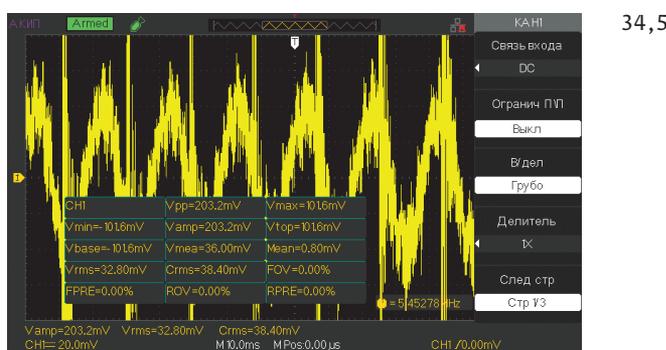
7



51



2



34,5

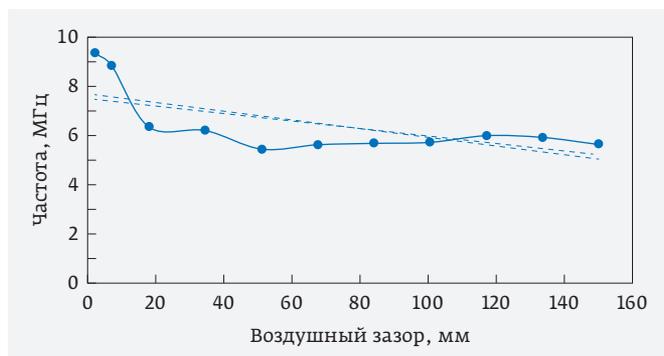


Рис. 14. Зависимость воздушного зазора от частоты при приближении датчика

емкостных датчиков позволяет создать полностью адаптивную систему с широкими функциональными возможностями и повышенной тактической надежностью. Использование адаптивных механизмов при создании измерительных систем на основе емкостных датчиков с разветвлением токов в измерительной цепи позволяет избежать необходимости ручной корректировки при изменении расположения стационарных предметов вблизи рабочего электрода, позволяет использовать емкостные датчики в сложных климатических условиях. В процессе исследования удалось получить следующие аксиомы – датчики и деталь в процессе измерения не должны иметь каких-либо контактов с оператором, так как это может привести к появлению большого количества шумов, увеличению емкости, непрогнозируемому росту частоты на осциллографе или частотомере, поэтому в данных экспериментах все передвижения детали производились с помощью диэлектрических фиксаторов и зажимов. Также недопустима работа посторонних радиоэлектронных приборов в радиусе не менее 1 м. При измерении зазора по вертикали осциллографом при приближении датчика к детали, частота увеличивается. При измерении выходных данных с датчика по горизонтали осциллографом профиль полученного графика был возрастающий, что частично соответствует профилю детали, заход датчика на сканирование детали осуществлялся от резьбы, резьба была отправной точкой, далее правее до самой границы детали по длине 80 мм, однако четкого профиля, повторяемого щупом пока не наблюдается, при измерении частотомером.

В процессе модернизации данной конструкции необходимо добиваться снижения влияния помех, для данных целей будет напечатан на 3D-принтере специальный защитный корпус на печатную плату данного прототипа, будет дополнительно учтен блок модуляции для уменьшения погрешности прибора. Однако уже на данном этапе можно определить биение детали при фиксации детали в трехкулачковом патроне и датчика на жесткой консоли.

При этом необходимо отметить, что себестоимость производства подобного датчика не превышает 700 руб. Также важно подчеркнуть, что бесконтактный метод не ограничивает диаметр измеряемого объекта, стандартные кругломеры и контурографы с контактным датчиком при этом ограничены по весу и габаритами детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кулманаков Д. С., Пщелко Н. С., Костовский И. П.** Многофункциональный емкостной датчик // Наука настоящего и будущего. 2020. Т. 1. С. 122–125.
2. **Пщелко Н. С., Соколова И. М., Чигирев Д. А.** Бесконтактный многофункциональный датчик на основе планарного конденсатора // Техника радиосвязи. 2021. № 3 (50). С. 71–82.
3. **Пщелко Н. С.** Многофункциональный датчик на основе планарного конденсатора для дистанционного зондирования. В кн.: Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции. Омск, 2020. С. 95–96.
4. **Пщелко Н. С., Моршель О. В., Кулманаков Д. С.** Схемотехническая реализация планарного емкостного датчика // В сб.: Research Innovations 2020. Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск. 2020. С. 59–66.
5. **Пщелко Н. С.** Многофункциональный датчик на основе планарного конденсатора для дистанционного зондирования // В кн.: Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции. Омск. 2020. С. 95–96.
6. **Novak J. L., Feddema I. T.** A capacitance-based proximity sensor for whole arm obstacle avoidance Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation // IEEE. 1992. PP. 1307–1314.
7. **Schlegl T. et al.** Combined capacitive and ultrasonic distance measurement for automotive applications // IEEE sensors journal. 2011. V. 11. No. 11. PP. 2636–2642.
8. **Акчурин Т. Р., Пщелко Н. С., Водкайло Е. Г.** Программа для контроля параметров емкостных структур методом вольт-фарадных характеристик. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016610272, 11.01.2016. Заявка № 2015660773 от 10.11.2015.
9. Tip Deflection Measurement – Inductive Sensor Principle Chapter. February 2007. Modeling of Electromechanical Systems. Rüdiger G. Ballas. Wilhelm Büchner Hoch.
10. **Галков А. В., Якунин А. Г.** К вопросу о разработке адаптивных охранных систем на основе емкостных датчиков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2005. № 1 (17). С. 121–125.
11. **Тетенькин Ю. Г.** Многофункциональный АЦП для параметрических датчиков резистивного и емкостного типа // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2009. № 12. С. 135–140.



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-МОРСКОЙ САЛОН-2023



Организатор



Выставочный
оператор



МКВ

При поддержке



21–25 июня

Кронштадт
Конгрессно-выставочный центр
Музея военно-морской славы

FLEET-EXPO.RU

ВСЕГДА НА ВЫСОТЕ

Наш телеграм-канал



 МИНПРОМТОРГ
РОССИИ

 Ростех

 **АВИАСАЛОН**
30 ЛЕТ С ВАМИ

www.aviasalon.com

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ
САЛОН**

МАКС 2023



25-30 ИЮЛЯ • ЖУКОВСКИЙ • МОСКВА • РОССИЯ