

Емкостной датчик угла наклона для автоматизации учета положения оптических и оптоэлектронных систем

Д.В. Дорофеев, Д.К. Кострин, С.А. Марцынюков, А.А. Ухов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург*

Аннотация: В работе рассматривается решение актуальной научно-технической задачи разработки датчика угла наклона, предназначенного для автоматизированного учета положения оптических и оптоэлектронных систем. Принцип действия датчика угла наклона или инклинометра заключается в измерении направления ускорения свободного падения в системе координат, связанной с целевым объектом, что позволяет вычислить углы отклонения вертикальной оси объекта от идеального положения. Емкостные датчики измеряют угол наклона за счет контроля изменения емкости из-за внешнего воздействия и зачастую имеют довольно простую конструкцию. В данной работе рассматривается конструкция датчика, в которой используется металлический шар, перемещающийся в диэлектрической трубе, с закрепленными на ней электродами. Для проведения исследований возможностей оптимизации устройства был разработан макет, на котором было проанализировано изменение емкости в зависимости от размеров шара, диаметра трубы и формы электродов. Важной целью данного исследования являлось определение оптимального диаметра шара внутри диэлектрической трубы для получения самых заметных изменений емкости. Наилучшие результаты были получены при использовании металлического шара с диаметром, немного уступающим диаметру диэлектрической трубы. Для измерения емкости можно использовать преобразование «емкость–частота» с последующим измерением последней с применением микроконтроллера. Получаемые значения емкости очень малы, что приводит к существенному влиянию любых соединительных проводов и требует уменьшения расстояния между первичным преобразователем и схемой обработки сигнала, что может быть достигнуто с применением технологий микромеханики и микроэлектромеханики и интегрированием всей конструкции датчика в один миниатюрный корпус. При этом при уменьшении размеров элементов первичного преобразователя очевидным образом снизится значение регистрируемой емкости, что в значительной мере будет осложнять ее преобразование в электрический сигнал.

Ключевые слова: угол наклона, электронный датчик, инклинометр, контроль положения, изменение емкости, первичный преобразователь, автогенератор, миниатюризация.

Введение

Датчики угла наклона или инклинометры широко применяются во многих областях науки и техники [1]. Электронные сигналы от таких датчиков позволяют балансировать строительные краны [2], оптимизировать работу тормозной системы автомобиля [3], уточнять направление бурения при проведении геофизических исследований [4], контролировать наклон

транспортных средств [5] и т. п. Важной областью применения данных устройств является автоматизация учета положения оптоэлектронных систем, в частности углов наклона по двум осям относительно горизонта [6], что может позволить повысить точность измерения при обработке данных, регистрируемых данными системами [7].

Принцип действия датчика угла наклона заключается в измерении направления ускорения свободного падения в системе координат, связанной с целевым объектом, что позволяет вычислить углы отклонения вертикальной оси объекта от идеального положения [8]. Все датчики измерения угла наклона можно разделить по принципу действия [9]: емкостные [10], резистивные [11], индуктивные [12], магнитные [13], оптические [14], тепловые [15] и жидкостные [16]. Емкостные датчики измеряют угол наклона за счет контроля изменения емкости из-за внешнего воздействия [17], часто имеют простую конструкцию и используют бесконтактный способ измерения.

Разработка оптимальной конструкции датчика угла наклона

В конструкции емкостного датчика угла наклона, использующего металлический шар, перемещающийся в диэлектрической трубе, можно использовать только два электрода [18]. Для проведения исследований возможности создания миниатюрного датчика был разработан макет, на котором было проанализировано изменение емкости устройства в зависимости от размеров шара, диаметра трубы и формы электродов (рис. 1). В данной конструкции не имеется контакта между металлическим шаром и электродами, что позволяет бесконтактно измерять угол наклона в зависимости от емкости датчика [19]. Указанную систему можно рассматривать как последовательное соединение двух конденсаторов – когда расстояние между электродами и шаром увеличивается, емкости уменьшаются. При этом общая емкость, измеренная с использованием двух электродов, соответственно также уменьшается. Для устранения

возможности перемещения шара вдоль корпуса трубы она с двух сторон закрыта заглушками таким образом, чтобы оставшееся по краям внутри трубы пространство лишь на доли миллиметра превышало диаметр шара.

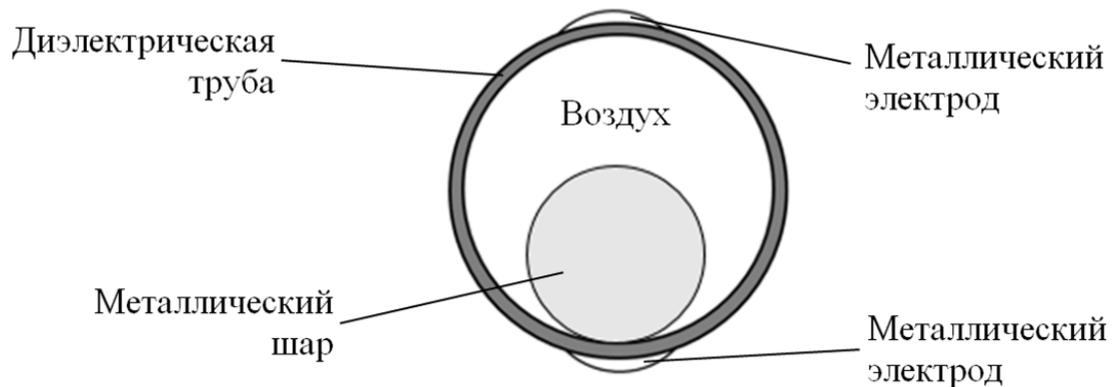


Рис. 1. – Конструкция датчика угла наклона

Корпус устройства сделан из полипропилена, толщина стенок 1.8 мм, внешний диаметр отверстия 40 мм, для проведения исследований было изготовлено несколько макетов с трубами длиной от 25 до 200 мм и диаметрами 32, 40 и 50 мм. Использованные металлические шары имели диаметры 12, 25, 30 мм. К электродам прикреплены провода для подключения измерительной аппаратуры. Для измерения значений емкости применялся прецизионный измеритель (LRC-метр) Agilent U1733C с изолированными щупами.

Значения емкостей пустых макетов датчиков (без металлического шара) составила от 1.13 до 2.42 пФ. При этом емкость уменьшается при увеличении радиуса корпуса, поскольку расстояние между электродами также возрастает, а при увеличении размера электродов емкость возрастает.

Для получения информации о влиянии заполнения межэлектродного пространства в случае макета с трубой длиной 135 мм и диаметром 40 мм были проведены исследования с применением большого количества маленьких металлических шариков диаметром 12 мм. Результаты измерения емкости с различным количеством шаров показаны на рис. 2, 3. При этом

необходимо отметить, что в реальной конструкции датчика систему с несколькими шарами использовать нельзя ввиду того, что шара могут располагаться в трубе произвольно и таким образом результаты измерений станут невоспроизводимыми.

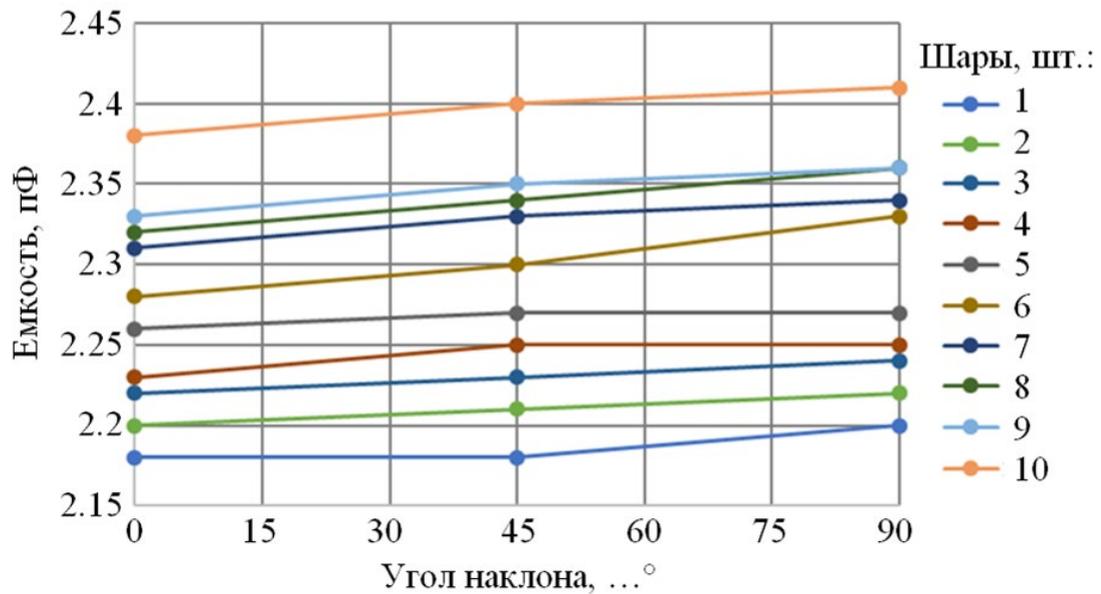


Рис. 2. – Зависимость емкости от угла наклона при разном количестве шаров в трубе

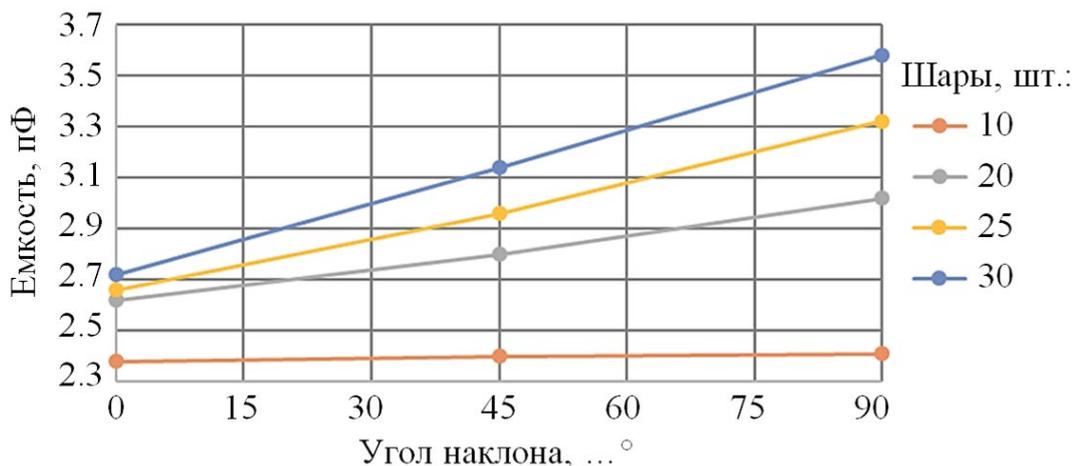


Рис. 3. – Зависимость емкости от угла наклона при разном количестве шаров в трубе

Как видно из графиков (рис. 2, 3) при использовании трубы и шариков указанных диаметров требуется применения как можно большего количества

последних для корректной работы устройства, чтобы расстояние между группой шаров и электродами было минимальным в одном положении системы и максимальным в другом (рис. 4).

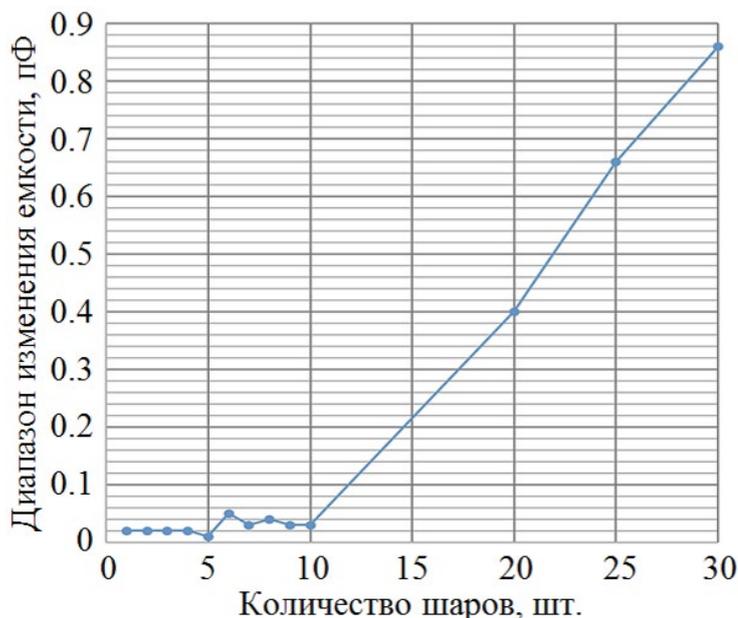


Рис. 4. – Зависимость разницы между максимальной и минимальной емкостями от количества шаров в трубе

Как видно из графика (рис. 4) разница между максимальной и минимальной емкостями заметно увеличивается только после увеличения количества шаров до 10, это связано с соотношением между диаметрами трубы (40 мм) и шаров (12 мм). Как показано на рис. 5, при переходе расположения шаров от позиции (а) к позициям (б) и (в) расстояние между электродами в вертикальном (нулевом) положении велико и емкость минимальна, однако в горизонтальном положении расстояние между шарами и двумя электродами мало и емкость заметно возрастает.

При использовании макета с трубой диаметром 40 мм и длиной 60 мм было проанализировано влияние разных диаметров шаров (12, 25, 30 мм) на значение измеряемой емкости. Для сравнения также была исследована работа системы при использовании 25 шаров диаметром 12 мм и 2 шаров диаметром 25 мм. Результаты исследования приведены на рис. 6.

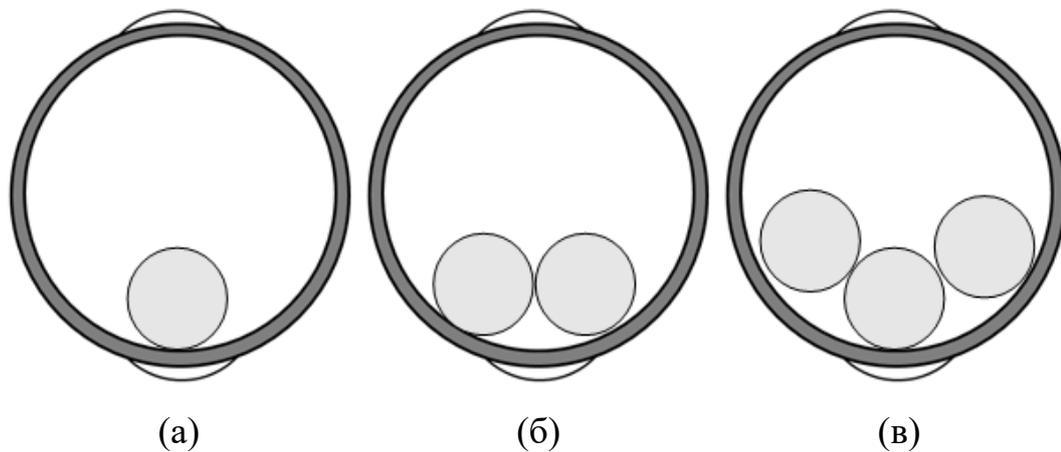


Рис. 5. – Расположение шаров в трубе при использовании:
(а) – до 10 шт.; (б) – от 10 до 20 шт.; (в) – от 20 до 30 шт.

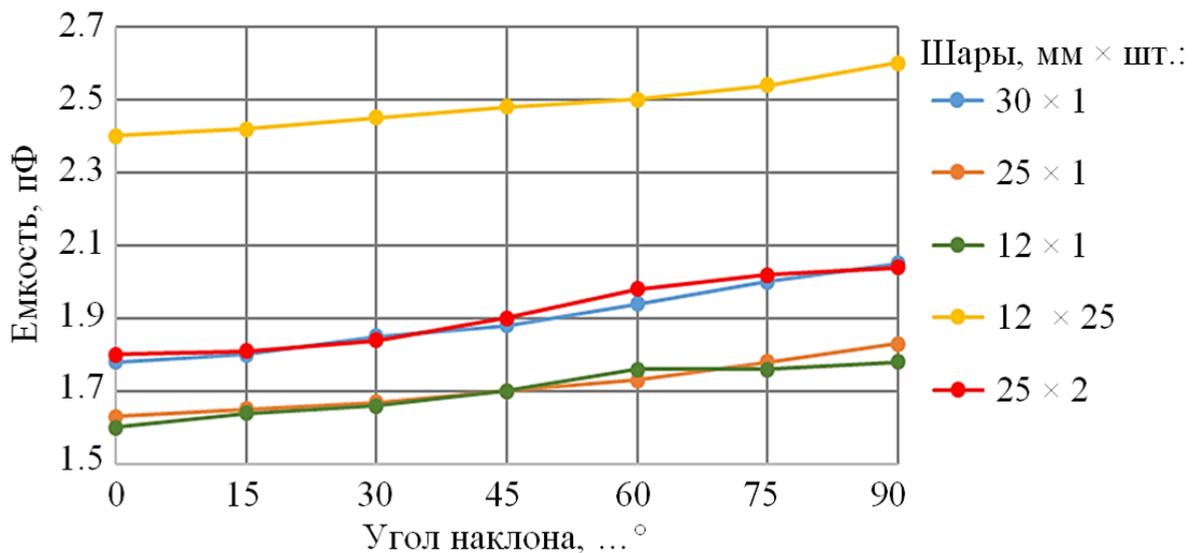


Рис. 6. – Зависимость емкости от угла наклона при разном количестве и разном размере шаров в трубе

Важной целью данного исследования является определение оптимального диаметра шара внутри диэлектрической трубы для получения самых заметных изменений емкости. Результат этих измерений на первый взгляд неочевиден, но, если сравнить диапазон изменения емкости, то лучшие результаты будут следующими: 1) шар диаметром 30 мм – 0.27 пФ; 2) шар диаметром 25 мм – 0.2 пФ; 3) шар диаметром 12 мм – 0.18 пФ.

Расположение шаров в трубе показано на рис. 7. Можно отметить, что шары с диаметрами 12 и 25 мм, размещенные внутри трубы среднего размера, проявляют себя схоже и в одиночном количестве для измерений не подходят. Применение большого количества шаров малого диаметра в данном случае также неэффективно, несмотря на прогноз, что с увеличением количества используемых шаров будет увеличиваться диапазон изменения емкости (рис. 4). В такой ситуации шары располагаются таким образом, что между ними и электродами всегда остается достаточно малое расстояние (рис. 7). Наилучшие результаты были получены при использовании единичного металлического шара с наибольшим диаметром, немного уступающим диаметру диэлектрической трубы.

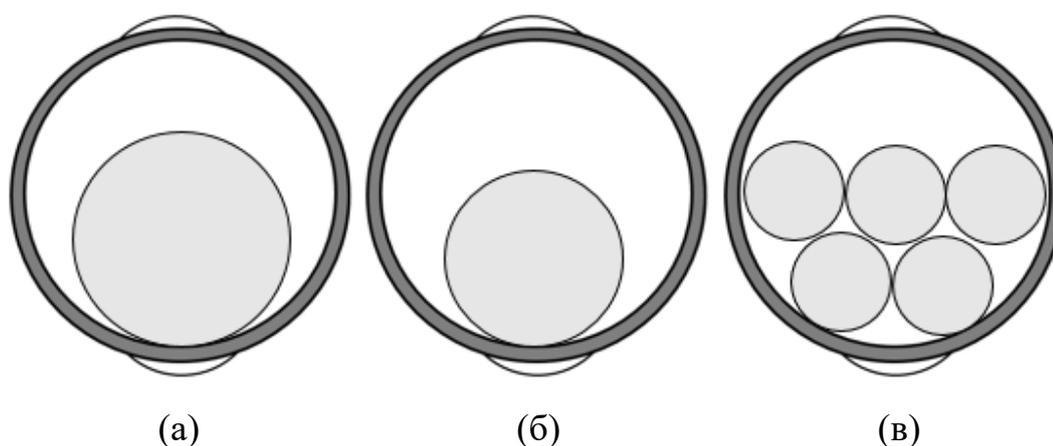


Рис. 7. – Расположение шаров в трубе при использовании:
(а) – 1 шар диаметром 30 мм; (б) – 1 шар диаметром 25 мм;
(в) – 25 шаров диаметром 12 мм

На рис. 8 показано как будет изменяться емкость от угла наклона при разном диаметре диэлектрической трубы в случае использования одинаковых по форме и размерам электродов (110 мм × 25 мм) и диаметре металлического шара (25 мм). Как и ожидалось, чем меньше диаметр диэлектрической трубы, тем меньше расстояние между металлическим шариком и электродами, и соответственно больше регистрируемая емкость.

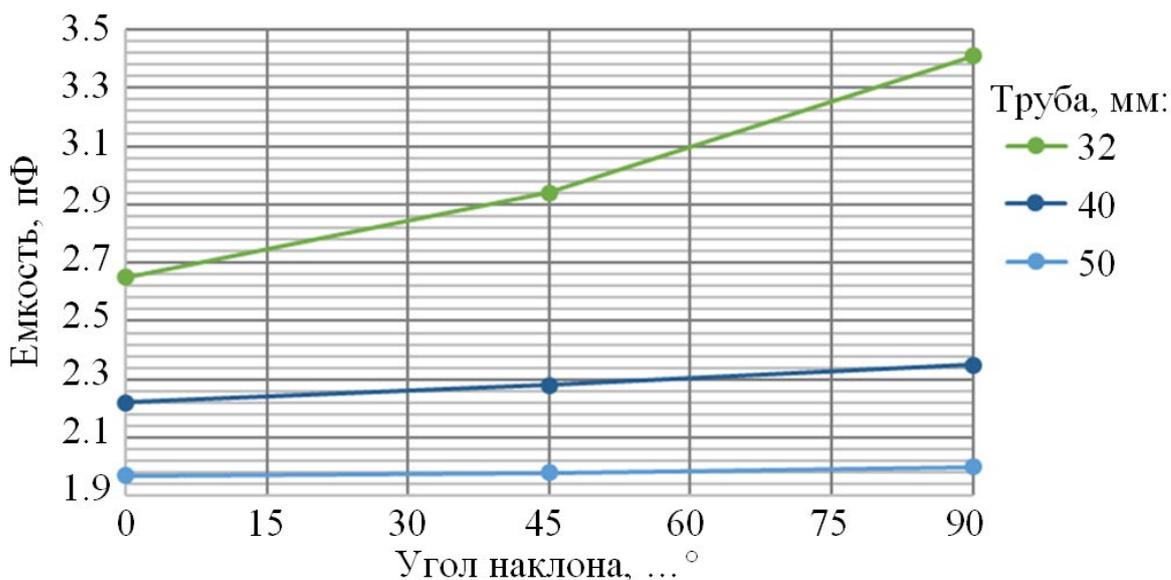


Рис. 8. – Зависимость емкости от угла наклона при разном диаметре трубы

Рассмотрим сравнение нескольких прототипов с разными размерами трубы и шаров, но с близким соотношением их диаметров. На рис. 9 представлены результаты измерения изменения емкости при соотношениях диаметров трубы и шара соответственно: 32/12 мм, 40/25 мм и 50/30 мм. Диапазон изменения емкости во всем интервале углов наклона составил соответственно 0.28 пФ, 0.13 пФ и 0.11 пФ.

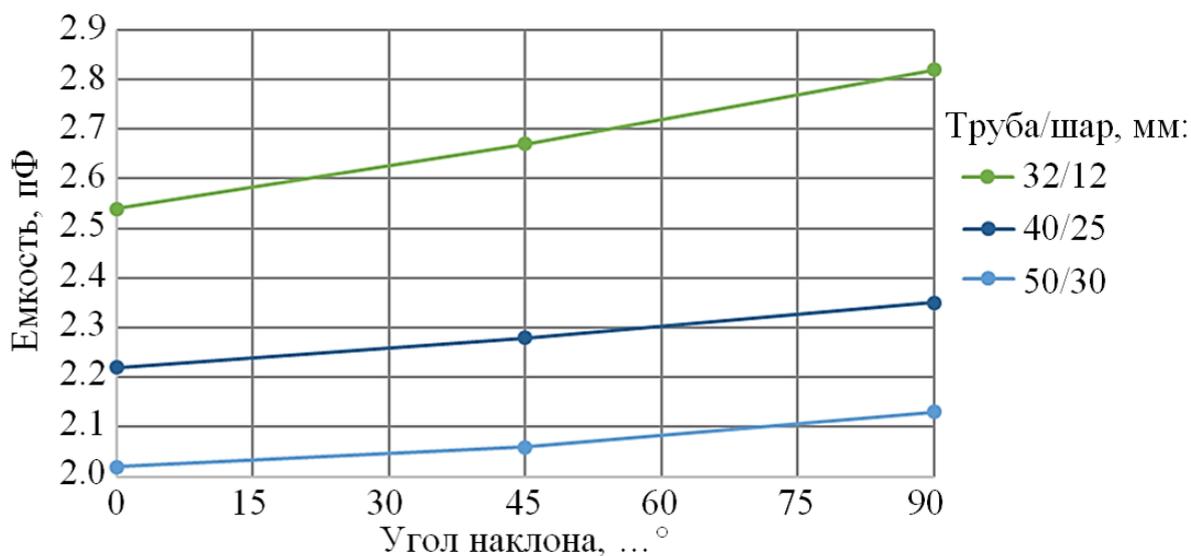


Рис. 9. – Зависимость емкости от угла наклона при разных диаметрах трубы и шара

Если взять наибольший по размеру шар, который можно разместить в трубе и измерить изменение емкости от угла наклона при новых соотношениях диаметров трубы и шара 32/25 мм и 40/30 мм, то будут зафиксированы следующие результаты (рис. 10).

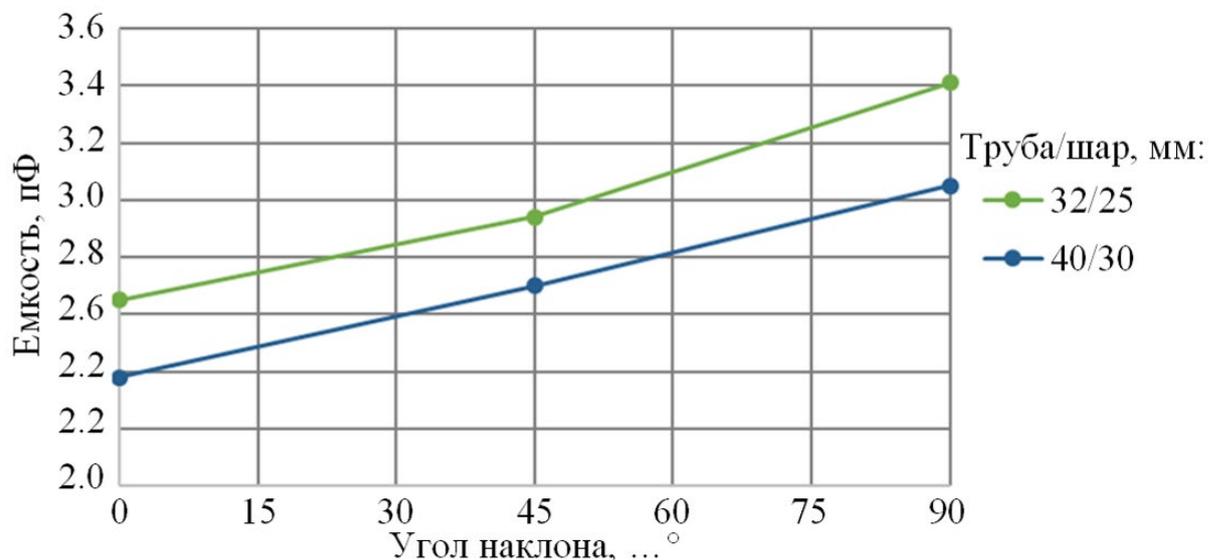


Рис. 10. – Зависимость емкости от угла наклона при разных диаметрах трубы и шара

Проведение подобных экспериментов позволяет определить нужные размеры и соотношения основных элементов датчика – диэлектрической трубы и металлического шара.

Сравним зависимости емкости от угла наклона для трех труб диаметром 32 мм при ее следующей длине: 25, 55 и 200 мм. Размеры электродов в данном случае составили соответственно 25 мм × 20 мм, 55 мм × 20 мм и 110 мм × 25 мм. По результатам экспериментов наблюдается существенное увеличение, как регистрируемой емкости, так и диапазона ее изменения с увеличением размера электродов. При этом такое увеличение размеров элементов устройства не представляется возможным, так как будет препятствовать последующей минимизации датчика.

Разработка электронной схемы для обработки результатов измерения

Самым распространенным и наиболее эффективным методом измерения емкости является преобразование «емкость–частота» [20] с последующим измерением последней с применением счетчиков или микроконтроллеров [21]. Преобразовать емкость в частоту можно с использованием схемы автогенератора, построенной на интегральном таймере 555-ой серии. В такой электронной схеме период генерируемых импульсов, а также их длительность, задаются номиналами применяемых резисторов и конденсаторов [22].

Работа такой электронной схемы может быть промоделирована с применением одного из специализированных программных пакетов, например LTspice [23], либо с использованием набравших популярность в последнее время онлайн сервисов, например www.falstad.com/circuit (рис. 11).

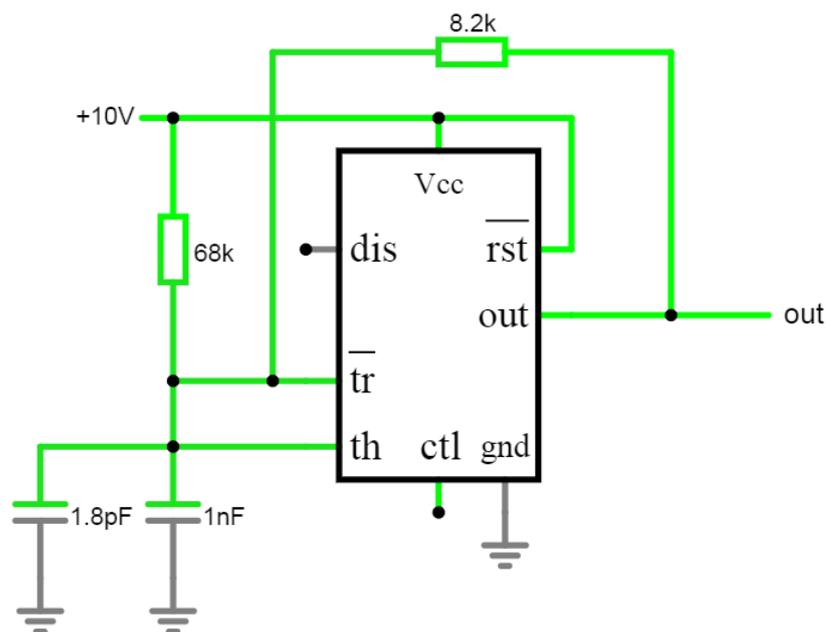


Рис. 11. – Электронная схема автогенератора на таймере 555-ой серии в онлайн сервисе для моделирования работы электронных устройств

Стабильная работа схемы автогенератора наблюдается в случае, когда значения сопротивлений и емкостей не выходят за рекомендуемые пределы [24]. В частности для емкости минимальным значением считается величина

порядка 1 нФ. Учитывая крайне малые значения емкостей, регистрируемых при работе датчика, использовать такой конденсатор в схеме не представляется возможным и необходимо применять параллельное включение двух емкостей – емкости от датчика и дополнительной емкости номиналом, например в 1 нФ. Данная схема генерирует прямоугольные импульсы, по результатам моделирования получено, что скважность сигнала составляет 43 %, а частота сигнала при номиналах резисторов 8.2 и 68 кОм равна 85.15 кГц для значения емкости 1.8 пФ + 1 нФ и 84.84 кГц для значения емкости 3.6 пФ + 1 нФ. Контролировать такие изменения частоты с применением современных микроконтроллеров с рабочей частотой в десятки и даже сотни МГц не представляет никаких проблем [22].

Схема автогенератора была собрана на макетной плате и ее работа проверена с помощью цифрового осциллографа Owon SDS1022 с полосой пропускания 20 МГц. Полученные значения частот сигналов при использовании в качестве измеряемой емкости обычного конденсатора отличались от полученных в результате моделирования не более чем на 2–3 %. При подключении в качестве емкости макета датчика частота изменилась практически в 10 раз, что по результатам проверки вызвано влиянием контактных проводов, соединяющих датчик с входами таймера 555-ой серии. В предыдущих экспериментах при использовании прецизионного измерителя применялись изолированные щупы, в данном случае при подсоединении обычными проводами в схеме появились паразитные емкости, индуктивности и сопротивления, существенно влияющие на значение емкости датчика и, как следствие, на частоту сигнала, генерируемого электронной схемой.

Однако, несмотря на существенное различие расчетных и экспериментальных значений частоты, датчик оказался полностью работоспособным – при изменении угла наклона фиксируется близкое к линейному изменение частоты генерируемого сигнала. С использованием

микроконтроллера длительность получаемых импульсов может быть зафиксирована по широко распространенному алгоритму – в случае обнаружения на входе микросхемы двух в подряд значений, соответствующих логической единице (высокий уровень напряжения), после двух в подряд значений, соответствующих логическому нулю (низкий уровень напряжения), фиксируется начало измеряемого импульса. В обратном случае фиксируется окончание измеряемого импульса, при этом количество проверок, осуществляемых с заданной частотой (которая может составлять значение в десятки и даже сотни МГц), произошедших между двумя упомянутыми ранее событиями позволяет определить длительность импульса. Измерив последнюю можно рассчитать частоту сигнала автогенератора, через нее получить величину емкости и далее определить угол наклона контролируемого с помощью датчика устройства.

Заключение

Для исследования возможностей оптимизации конструкции емкостного датчика угла наклона был разработан набор макетов, представляющих собой диэлектрические трубы различного диаметра и длины с металлическими электродами на их внешней поверхности и размещенными внутри металлическими шарами разного диаметра.

По результатам экспериментов установлено, что диаметр диэлектрической трубы и диаметр металлического шара должны быть достаточно близки, при этом существует оптимальное соотношение, т. к. чем меньше остается пространство внутри трубы, тем меньше возможностей для перемещения у шарика и, соответственно, тем меньше изменяется емкость системы при изменении угла наклона. При увеличении размеров электродов, размещенных снаружи диэлектрической трубы, становится выше регистрируемая емкость и точнее можно определить угол наклона.

Использование несколько меньших по размеру шариков при определенных условиях способно увеличить точность определения угла наклона за счет большего диапазона изменения значения емкости, но не может быть применено при создании серийных образцов электронных датчиков по причине крайне низкой воспроизводимости результатов. Также можно отметить низкую стойкость рассмотренной конструкции датчика угла наклона к вибрациям.

В качестве будущих направлений для исследования можно указать уменьшение толщины стенок диэлектрической трубы и использование других материалов, что может позволить значительно повысить как величину регистрируемой емкости, так и диапазон ее изменения для повышения точности измерения угла наклона. Также необходимо проанализировать применение другого количества электродов, иной их формы и расположения. Еще одним направлением для исследования является возможность замены воздуха внутри трубы на другой газ или невязкую жидкость, что может позволить добиться повышения емкости в несколько раз.

Рассматривая результаты обработки сигнала от разработанного датчика емкостного типа, можно сказать, что зависимость выходного сигнала от изменения угла наклона близка к линейной. Однако получаемые значения емкости очень малы, что приводит к существенному влиянию любых соединительных проводов и требует уменьшения расстояния между первичным преобразователем и схемой обработки сигнала, что может быть достигнуто с применением современных технологий микромеханики и микроэлектромеханики и интегрированием всей конструкции датчика в один миниатюрный корпус [25]. При этом при уменьшении размеров элементов первичного преобразователя очевидным образом снизится значение регистрируемой емкости, что в значительной мере будет осложнять ее преобразование в электрический сигнал.

Еще одной интересной задачей является модификация конструкции для перехода к одновременному контролю угла наклона по двум осям, что может быть осуществлено переходом от диэлектрической трубы с заглушками к диэлектрической полусфере, закрытой сверху крышкой, или же к полной диэлектрической сфере. В данном случае также требуется проведение исследований для оптимизации конструкции, в частности диаметров полусферы (или сферы) и металлического шара, и их соотношения, а также размеров, формы и расположения электродов.

Литература

1. Кострин Д.К. Современные электронные датчики угла наклона: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17. № 6. С. 5–23.
 2. Liu C., Park J.-W., Spencer Jr. B. F. et al. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope // Smart Materials and Structures. 2017. Vol. 26. № 10. P. 105005.
 3. Базанов П., Вербов И. Датчики положения в современных системах автоматизации в примерах и иллюстрациях // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 74–77.
 4. Биндер Я.И., Елисеенков А.Е., Лысенко А.С. и др. Мобильная инклинометрическая станция на основе микромеханических чувствительных элементов для съемки траекторий стволов группы скважин подземной выработки // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С. 95–106.
 5. Norgia M., Boniolo I., Tanelli M. et al. Optical sensors for real-time measurement of motorcycle tilt angle // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58. № 5. pp. 1640–1649.
 6. Wei S., Jingqia F. The Study of Variable Sensitivity in Dual-Axis Tilt Sensor // Procedia Engineering. 2012. Vol. 29. pp. 2605–2609.
-

7. Kok M., Hol J.D., Schon T.B. Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. Delft: Now Foundations and Trends, 2017. 166 p.
 8. Kumar A.S.A., George B., Mukhopadhyay S.C. Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. № 6. pp. 7195–7206.
 9. Luczak S., Ekwinska M. Electric-Contact Tilt Sensors: A Review // Sensors. 2021. Vol. 21. № 4. P. 1097.
 10. Xu H., Zhao Y., Zhang K. et al. A Capacitive MEMS Inclinometer Sensor with Wide Dynamic Range and Improved Sensitivity // Sensors. 2020. Vol. 20. № 13. P. 3711.
 11. Deak J., Jin I. High-Field Tunneling Magnetoresistive Angle Sensor // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55. № 10. P. 6700104.
 12. Cheung Y.-K., Yu H. An Electrochemical Tilt Sensor with Double-Band Electrodes Fabricated by Wire Winding // Micromachines. 2022. Vol. 13. № 8. P. 1229.
 13. Ando B., Ascia A., Baglio S. A ferrofluidic inclinometer in the resonant configuration // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 59. № 3. pp. 558–564.
 14. Inaudi D., Blin R., Timotijevic B. et al. Integrated Optics Inclinometers for SHM // Journal of Nondestructive Testing. 2020. Vol. 25. № 1. P. 24944.
 15. Zhang S., Chen C., Bin W. et al. Dual-axis thermal convective inclinometer based on CNT/PDMS composite // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. Vol. 29. pp. 18997–19004.
 16. Thi Thuy H.T., Dinh T.D., Vu Quoc T. et al. A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor Based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure // IETE Journal of Research. 2020. Vol. 66. № 5. pp. 685–696.
-

17. Ухов А.А., Кострин Д.К., Герасимов В.А. и др. Емкостной датчик контроля обледенения поверхности // Контроль. Диагностика. 2023. № 5. С. 50–55.
18. Lee C.H., Lee S.S. Study of Capacitive Tilt Sensor with Metallic Ball // ETRI Journal. 2014. Vol. 36. № 3. pp. 361–366.
19. Khan S.M., Qaiser N., Hussain M.M. An inclinometer using movable electrode in a parallel plate capacitive structure // AIP Advances. 2019. Vol. 9. № 4. P. 045118.
20. Орлов А.А., Игнатъев В.К. Цифровой емкостный дилатометр // Инженерный вестник Дона. 2011. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/462
21. Марченко И.О. Система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков в учебном процессе // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1916
22. Кострин Д.К., Лисенков А.А., Ухов А.А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
23. Sisman A. A Complete LTspice Simulation Model for SAW // International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences. 2024. Vol. 36. № 1. pp. 59–69.
24. Кострин Д.К., Ухов А.А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.
25. Wang S., Wei X., Weng Y. et al. A Novel Single-Axis MEMS Tilt Sensor with a High Sensitivity in the Measurement Range from 0 to 360° // Sensors. 2018. Vol. 18. № 2. P. 346.

References

1. Kostrin D.K. Izvestiya SPbGETU «LETI». 2024. Vol. 17. № 6. pp. 5–23.



2. Liu C., Park J.-W., Spencer Jr. B. F. et al. Smart Materials and Structures. 2017. Vol. 26. № 10. p. 105005.
 3. Bazanov P., Verbov I. Komponenty i tekhnologii. 2006. № 7. pp. 74–77.
 4. Binder Ya.I., Eliseenkov A.E., Lysenko A.S. et al. Giroskopiya i navigatsiya. 2013. № 1. pp. 95–106.
 5. Norgia M., Boniolo I., Tanelli M. et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58. № 5. pp. 1640–1649.
 6. Wei S., Jingqia F. Procedia Engineering. 2012. Vol. 29. pp. 2605–2609.
 7. Kok M., Hol J.D., Schon T.B. Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. Delft: Now Foundations and Trends, 2017. 166 p.
 8. Kumar A.S.A., George B., Mukhopadhyay S.C. IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. № 6. pp. 7195–7206.
 9. Luczak S., Ekwinska M. Sensors. 2021. Vol. 21. № 4. p. 1097.
 10. Xu H., Zhao Y., Zhang K. et al. Sensors. 2020. Vol. 20. № 13. pp. 3711.
 11. Deak J., Jin I. IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55. № 10. p. 6700104.
 12. Cheung Y.-K., Yu H. Micromachines. 2022. Vol. 13. № 8. p. 1229.
 13. Ando B., Ascia A., Baglio S. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 59. № 3. pp. 558–564.
 14. Inaudi D., Blin R., Timotijevic B. et al. Journal of Nondestructive Testing. 2020. Vol. 25. № 1. p. 24944.
 15. Zhang S., Chen C., Bin W. et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. Vol. 29. pp. 18997–19004.
 16. Thi Thuy H.T., Dinh T.D., Vu Quoc T. et al. IETE Journal of Research. 2020. Vol. 66. № 5. pp. 685–696.
 17. Ukhov A.A., Kostrin D.K., Gerasimov V.A. et al. Kontrol'. Diagnostika. 2023. № 5. pp. 50–55.
 18. Lee C.H., Lee S.S. ETRI Journal. 2014. Vol. 36. № 3. pp. 361–366.
-



19. Khan S.M., Qaiser N., Hussain M.M. AIP Advances. 2019. Vol. 9. № 4. p. 045118.
20. Orlov A.A., Ignat'ev V.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/462
21. Marchenko I.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1916
22. Kostrin D.K., Lisenkov A.A., Ukhov A.A. Elektronnye sredstva kontrolya tekhnologicheskikh protsessov [Electronic means of technological processes control]. Sankt-Peterburg: SPb ETU «LETI», 2016. 228 p.
23. Sisman A. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences. 2024. Vol. 36. № 1. pp. 59–69.
24. Kostrin D.K., Ukhov A.A. Datchiki v elektronnykh ustroystvakh [Sensors in electronic devices]. Sankt-Peterburg: SPb ETU «LETI», 2013. 240 p.
25. Wang S., Wei X., Weng Y. et al. Sensors. 2018. Vol. 18. № 2. p. 346.

Дата поступления: 16.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025