# Автоматизированный стенд исследования индуктивных датчиков, построенных на основе хаотических осцилляторов

Т. И. Каримов<sup>1</sup>, А. И. Каримов<sup>2</sup>, О. С. Дружина<sup>3</sup>, В. С. Холкин<sup>4</sup>, М. Д. Волков<sup>5</sup>

Кафедра систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Россия

{<sup>1</sup>tikarimov, <sup>2</sup>aikarimov, <sup>3</sup>osdruzhina}@etu.ru, <sup>4</sup>super.holkin@mail.ru, <sup>5</sup>volkm199816@yandex.ru

Аннотация. Одним из перспективных направлений конструирования индуктивных датчиков является проектирование их на основе хаотических осцилляторов. Такой подход позволяет увеличить дальность действия и чувствительность датчиков, линеаризовать их характеристику, а также обеспечить ряд других полезных свойств. Исследование хаотической динамики в таких сенсорных системах может быть осуществлено с применением компьютерного моделирования, однако их конкретная схемная реализация может отличаться от модели, в связи с чем необходимо их экспериментальное Предлагаемый стенд исследование. позволяет бифуркационные автоматически строить диаграммы колебаний хаотического датчика, перемещая детектируемый объект относительно катушки индуктивности, а также считать необходимые метрики. Таким образом, повышается качество и скорость исследовательского проектирования.

Ключевые слова: индуктивный датчик; автоматизация научных исследований; бифуркационная диаграмма; динамический хаос

# I. Введение

Для разработки и тестирования датчиков приближения необходимы исследовательские и отладочные стенды. Они представляют собой системы контролируемых линейных перемещений с ручным или электрическим приводом и обратной связью, в простейшем случае, шкалой. Современные технологии делают возможным создание высокоавтоматизированных систем с компьютерным управлением и сбором данных, адаптированных под конкретную измерительную задачу.

Типичная конструкция современного стенда исследования индуктивных датчиков описана Гуо и соавторами [1], (рис. 1а). Стенд, разработанный этого исследования, состоит специально для ИЗ металлической рамы с винтовым линейным приводом, соединенным с сервомотором, и цифрового контактного измерителя линейных перемещений. Точность перемещения на стенде составляет 20 мкм, диапазон перемещения – 7 мм.



a)



Артур Каримов поддержан грантом РНФ, проект №19-79-00192



Рис. 2. Схема хаотического индуктивного датчика, основанного на системе Sprott Case N и исследованного на разработанном стенде. Иллюстрация из [4]

В работе [2] описывается стенд для исследования датчиков, созданный с применением коммерчески доступной системы линейных перемещений фирмы Newport, и аппаратно-программных решений National Instruments (рис.  $1 \delta$ ). Используемый температурностабильный стол Newport позволяет перемещать объекты на 13 мм с микронной точностью. Для исследования датчиков могут применяться и стенды, осуществляющие перемещение в трехмерном пространстве. Так, в работе [3] исследуется магнитное поле вблизи катушек индуктивных сенсоров различных конфигураций с применением механической руки Parker Automation и туннельного магниторезистивного датчика Micromagnetics STJ-020.

Отличительной чертой упоминаемых стендов является использование дорогостоящей прецизионной механики. Межу тем, зачастую необходимость в микронных перемещениях отсутствует, в то время как значение имеют большая амплитуда перемещений, пегкость воспроизведения конструкции, её модульность. Особые перспективы для конструирования подобных стендов демонстрирует 3D-печать пластиком быстро развивающаяся и дешевеющая Будучи технология. диэлектриком, пластик не меняет характеристики электромагнитных полей и не искажает результаты измерений.

Потребность в подобном стенде была выявлена в ходе работы над датчиком на основе системы Sprott Case N [4], электрическая схема которого представлена на рис. 2. Идея, лежащая в основе этого и подобных датчиков, следующая. На основе хаотического дифференциального уравнения синтезируется хаотическая электрическая цепь с индуктивной катушкой, выступающей чувствительным элементом. При изменении индуктивности, т.е. при появлении вблизи катушки предмета с электромагнитными свойствами, колебания в цепи меняются. Гипотетически, датчики на основе хаотических осцилляторов имеют ряд положительных свойств: повышенная чувствительность, дальности действия, селективности, возможность

измерения нескольких величин одновременно [5]. Некоторые ИЗ этих свойств подтверждаются B экспериментах [4]. Однако нужна длительная научноисследовательская работа, чтобы создать базу для возможности промышленного внедрения ланной технологии. Создание испытательного стенда является необходимым этапом в этой работе.

Публикация организована следующим образом. В разделе II описана конструкция механической и электронной частей стенда. В разделе III представлен пример исследования динамики хаотической цепи с применением данного стенда. Раздел VI содержит выводы.

## II. Конструкция стенда

### А. Описание механики

Внешний вид разработанного стенда представлен на рис. 3. Его основой является промышленная система линейных перемещений с винтовым приводом (шаг 1 мм на оборот) и линейными подшипниками, применяемая в станках с ЧПУ и 3D-принтерах. Винт через муфту соединяется с шаговым двигателем OUKEDA 17HS2408. Двигатель имеет 200 шагов на оборот. С помощью технологии micro-stepping на драйвере шагового двигателя это число увеличено до 400. Таким образом, поворот двигателя на один микро-шаг соответствует линейному перемещению в 2,5 мкм.

Как и в большинстве других конструкций, на подвижной платформе закрепляется пель. а чувствительная катушка располагается на жесткой неподвижной стойке. Высота стойки и подставки под цель рассчитана таким образом, чтобы минимизировать металлических элементов влияние на результаты измерений. Модульное крепление позволяет исследовать не только плоские катушки, но и катушки от металлодетекторов, а также любые другие. Основание подвижной платформы выполнено в форме углах равнобедренного треугольника, в которого находятся два линейных подшипника и ползунок. Чтобы обеспечить точность выставки элементов линейного привода на основании, сконструированы плоские Vобразные опоры. На одной из опор крепится шаговый двигатель, на другой – инфракрасный датчик нулевого положения. Чувствительный элемент ИК-латчика завизирован узкой щелью, чтобы обеспечить точность выставки нуля.

На подвижной платформе размещена полностью пластиковая система линейного перемещения с двумя боковыми направляющими и винтом, по которому перемещается платформа с держателем для цели (металлической или фольгированной пластины толщиной до 2 мм). Опыт показывает, что использование безусадочного пластика и сопла диаметром 0,4 мм обеспечивает хорошее качество 3D-печатной резьбы. Винт позволяет производить ручную установку цели на нужной высоте, центрировано по отношению к катушке.

Все специфичные детали спроектированы в САПР Autodesk Fusion 360 и печатаются из пластика PLA.

## Б. Аппаратно-программное обеспечение

Система управления стендом состоит из компьютера с установленной средой LabVIEW, станшии прототипирования ELVIS III, управляемой из LabVIEW и колебания позволяющей снимать исследуемого осциллятора, микропроцессорного хаотического И контроллера, отвечающего за управление мотором и обработку сигнала ИК-датчика нулевого положения.

Взаимодействие между контроллером и программой на LabVIEW (рис. 4) осуществляется по UART в режиме «запрос-ответ». Реализованы два типа команд:

- команда поиска нулевой позиции. Эта команда подается при запуске цикла измерений. Получив ее, контроллер начинает перемещать платформу с объектом в сторону датчика нуля, по достижении которого перемещение прерывается.
- команда смещения на определенную позицию. Позицией считается расстояние от нуля. LabVIEW циклически отправляет эту команду в процессе измерений, каждый раз снимая колебания в хаотической цепи.

Нулевое положение соответствует расстоянию 1 мм от катушки до цели.



Рис. 3. Трехмерная модель разработанного стенда (а), модульное крепление плоской катушки (б) и вид подвижной платформы на линейных подшипниках сзади: виден вертикальный линейный привод и подвижная платформа для крепления цели (в)



Рис. 4. Фрагменты лицевой панели виртуального прибора управления стендом, созданного в среде LabVIEW 2019: область основных настроек и кнопка запуска (а) и область интерфейса с хаотической цепью: ручка управления напряжением V1 (см. рис. 2) и график колебаний в цепи (б)



Рис. 5. Данные, полученные с помощью стенда: бифуркационная диаграмма осциллятора на основе системы Спротта Case N при V1 = 1,545 (a), и пример аттрактора при расстоянии до цели в 120 мм (б)

#### III. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХАОТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Перед началом цикла измерения оператор задает расстояние линейного перемещения цели, число точек и время измерения в каждой позиции. Затем стол автоматически перемещается по направлению от катушки и строит бифуркационную диаграмму (БД). Вращением ручки АОО (источник напряжения V1 на рис. 2 можно характеристики сенсора [4]. Результатом изменять измерения применением стенда является с БЛ хаотического датчика по расстоянию. БД – важнейший инструмент исследования хаотической динамики, позволяющий визуализировать смену режимов цепи, например, периодического и хаотического. Факт смены режима может интерпретироваться датчиком как порог срабатывания [4]. Кроме того, информативной метрикой является амплитуда аттрактора [5], хорошо видимая на БД и также вычисляемая в ходе измерений.

Пример построения БД сенсора, показанного в виде схемы на рис. 2, приведен на рис. 5*a*. На рис. 5*б* приводится аттрактор цепи в крайнем положении стола. В тесте использовалась однослойная печатная катушка индуктивностью 120 мкГн и размерами 90 × 90 мм, показанная на рис. 36; было установлено напряжение V1 = 1,545 В. По БД видно, что сенсор может обнаружить цель – пластинку текстолита, фольгированного медью, размером 50 × 50 мм – на расстоянии до 50 мм. Более подробный анализ динамики сенсорной хаотической цепи выходит за рамки данной публикации.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы по созданию индуктивных датчиков на основе хаотических осцилляторов был спроектирован и протестирован стенд для их исследования и испытаний. Все детали стенда, кроме линейного привода, выполнены по технологии 3D-печати из пластика PLA. Система сбора данных и управления стендом построена на основе программно-аппаратных решений фирмы National Instruments и позволяет проводить съемку характеристик датчика в автоматическом режиме. Вручную подобная съемка была бы в 10–100 раз более длительна. Преимуществами механики данного стенда являются:

- Обеспечение линейных перемещений на расстояния до 360 мм с точностью ≥ 2,5 мкм;
- Простота конструкции при стоимости не выше 50\$, что дает возможность использовать стенд не только в исследовательских, но и в учебных целях.

Реальная точность линейного позиционирования на стенде составляет примерно 25–50 мкм, что будет установлено поверкой в ходе дальнейших исследований. Использование винта с шагом 2–4 мм для линейного привода может оказаться более выгодным по скорости измерений без ущерба для точности.

#### Список литературы

- Y. X. Guo, Z. B. Shao, H. B. Tao, K. L. Xu and T. Li, "Dimension-Reduced Analog-Digital Mixed Measurement Method of Inductive Proximity Sensor" // Sensors, 17(7), 1533, 2017.
- [2] D. Kang, W. Lee, and W. Moon, "A technique for drift compensation of an area-varying capacitive displacement sensor for nano-metrology" // Procedia Engineering, vol. 5, 2010, pp. 412-415.
- [3] R. Gibbs, G. Moreton, T. Meydan, and P. Williams, "Comparison between modelled and measured magnetic field scans of different planar coil topologies for stress sensor applications" // Sensors, 18(4), 931, 2018.
- [4] T.I. Karimov, E.G. Nepomuceno, O.S. Druzhina, A.I. Karimov and D.N.Butusov, "Chaotic Oscillators as Inductive Sensors: Theory and Practice" // Sensors, 19(19), 4314, 2019.
- [5] T.I. Karimov, O.S. Druzhina, V.Y. Ostrovskii, A.I. Karimov and D.N. Butusov, "The Study on Multiparametric Sensitivity of Chaotic Oscillators," // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint-Petersburg, Jan. 27–30, 2020, IEEE, pp. 134–137.