

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Моделирование радиоволнового измерителя
малых механических смещений**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2222 группы
направления (специальности) 03.04.02 «Физика»
института физики
Калинина Артёма Викторовича

Научный руководитель
д.т.н., профессор

А. Л. Хвалин

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор

В. М. Аникин

Саратов 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Колебания и волны являются фундаментальными явлениями, присущими любым реальным физическим, химическим, биологическим и другим системам. Для получения информации о состоянии объектов с помощью измерительных устройств, основанных на реализации колебательных и волновых процессов в системах различной природы, используется большое разнообразие принципов создания первичных измерительных преобразователей.

Чаще всего механические колебания представляют собой нежелательные явления, сопровождающие полезные процессы в технологических установках. Также колебания могут создаваться принудительно для выполнения определенных функций в самых разнообразных технических устройствах. В тех или иных случаях существует необходимость непрерывного контроля параметров движения, а также комплексной оценки состояния оборудования. Получение информации о параметрах движения и колебаниях при эксплуатации промышленного оборудования, приборов и всевозможных динамических объектов представляет собой первоочередную задачу при оценке качества и надёжности работы, как отдельных узлов, так и всех установок в целом.

В связи с вышеизложенным актуальна разработка и создание высокоэффективных измерительных устройств и их основных функциональных элементов.

Целью данной работы является сравнительный анализ методов измерения малых механических смещений и компьютерное моделирование устройства для их измерения на основе радиоволнового метода в СВЧ-диапазоне частот от 1 до 30 ГГц и определение его рабочих характеристик.

Задача данной работы — отразить современное состояние в области теории и практики радиоволновых измерений различных параметров перемещений объектов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы – 51 страница, из них 41 страница – основное содержание, включая 17 рисунков и 2 таблицы, список использованных источников из 24 наименований.

В разделе 1 проводится сравнительный анализ методов определения параметров колебаний. Приводится разделение данных методов на две основные группы – контактные и бесконтактные, а также дальнейшая классификация бесконтактных методов измерения и их сравнительная характеристика. В конце раздела обосновывается выбор радиоволнового метода измерения для решения многих задач, в том числе для выполнения задачи данной работы.

В разделе 2 описаны физические основы и технические средства реализации радиоволновых методов измерения, перечислены основные части, из которых состоит радиоволновой измерительный прибор, а также приведено подробное описание конструкций чувствительных элементов (датчиков) – т. е. той части радиоволнового измерительного прибора, в котором осуществляется первичное преобразование контролируемой величины в информативный параметр. В качестве таких элементов могут выступать линии передачи и резонаторы различных форм (с использованием отрезков длинных линий, волноводов, замедляющих систем), а также передающие и приёмные антенны (вибраторы, рупоры и др.).

В разделе 3 приведены примеры устройств для измерения параметров движений. Рассмотрены различные конструкции измерителей линейной скорости, а также измерителей вибраций, реализующих радиоволновой интерференционный и резонаторный методы.

В разделе 4 приводится краткое описание фазового интерференционного метода и обоснование выбора его использования в качестве основного.

Заключительный пятый раздел содержит информацию по моделированию устройства. Описан процесс создания в САПР отрезка волновода и исследуемого объекта, расположенного на некотором расстоянии от выхода волновода. Размеры данного объекта значительно превышают поперечные размеры волновода. На одном из концов волновода установлен порт, через который входит волна, на поверхности исследуемого объекта, расположенной возле конца волновода, также установлен порт, в который волна приходит.

Для моделирования электромагнитного поля, создаваемого в процессе распространения волны между волноводом и исследуемым объектом, была создана область, обозначенная как «гибридный регион», в котором проводился анализ гибридным методом конечных элементов и интегральных уравнений.

Были смоделированы 3 волноводных преобразователя с различными размерами для разных рабочих частот:

- 1) шириной 7,2 мм, высотой 3,4 мм и длиной 20 мм для частоты 30 ГГц;
- 2) шириной 23 мм, высотой 10 мм и длиной 50 мм для частоты 10 ГГц;
- 3) шириной 160 мм, высотой 80 мм и длиной 500 мм для частоты 1 ГГц.

Для каждого из них была построена зависимость фазы отражённого сигнала от расстояния между концом отрезка волновода и исследуемым объектом в различных диапазонах, исходя из которых была оценена чувствительность и погрешность измерения.

Было проведено сравнение характеристик смоделированного устройства с характеристиками радиоволновых вибродатчиков и измерителей (преобразователей) расстояний СВЧ-диапазона, имеющимися на рынке. Представленные измерители отличаются чрезвычайно разнообразным сочетанием рабочих характеристик в зависимости от их функционального назначения: диапазон частот, чувствительность, рабочие условия (температура окружающей среды, влажность воздуха, атмосферное давление), экономичность, массогабаритные показатели и др. Среди отобранных наиболее

близких по характеристикам измерителей полученное в ходе данной работы устройство слегка уступает в погрешности измерения расстояния.

ВЫВОДЫ

В результате работы был проведён сравнительный анализ методов измерения малых механических смещений. Радиоволновые методы измерения и приборы широко используются для контроля различных технологических процессов. Бесконтактные радиоволновые датчики являются надёжными и имеют широкую область применения, например контроль вибраций корпусов транспортных средств, исследование вибраций лопаток газовых турбин, измерения на виброгрохотах и испытательных полигонах и др., а также в биологических исследованиях. Они не размещаются на исследуемом объекте, следовательно, мало подвержены механическим, тепловым и другим негативным воздействиям.

Создана компьютерная модель преобразователя «фаза-расстояние» для измерения малых механических смещений в СВЧ-диапазоне частот от 1 до 30 ГГц. Для частот $f = 1$ ГГц, $f = 10$ ГГц и $f = 30$ ГГц были построены графики зависимости фазы сигнала от расстояния между концом отрезка волновода и исследуемым объектом, исходя из которых была оценена чувствительность и погрешность измерения.

Преобразователь с рабочей частотой 30 ГГц имеет чувствительность $36,7^\circ \cdot \text{мм}^{-1}$, а также относительно небольшую погрешность измерения расстояния $\Delta L \approx 2,7$ мкм.

Преобразователь с рабочей частотой 10 ГГц имеет чувствительность $10,3^\circ \cdot \text{мм}^{-1}$, погрешность составляет $\Delta L \approx 9,7$ мкм.

Преобразователь с рабочей частотой 1 ГГц имеет чувствительность $0,85^\circ \cdot \text{мм}^{-1}$, погрешность измерения расстояния $\Delta L \approx 118$ мкм. Несмотря на внушительные размеры данного преобразователя и относительно большую погрешность измерения расстояния, он может быть использован в большом диапазоне измерения размеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Седалищев В.Н. Физические основы использования колебательных и волновых процессов в измерительных устройствах: учебное пособие. Барнаул: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет», 2015.
2. Волковец А.И., Руденко Д.Ф., Гусинский А.В. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации. Доклады БГУИР, 2007. № 4 (20). С. 58 – 64.
3. Хмелёв В.Н., Цыганок С.Н., Левин С.В. Разработка и исследование пьезо-преобразователя для контроля амплитуды ультразвуковых колебаний излучающих поверхностей. Ползуновский вестник, 2014. № 2. С. 88 – 91.

4. Сакевич С.Н. Простой радиоволновой СВЧ-вибромметр. Южно-Сибирский научный вестник, 2017. №4 (20). С. 75 – 81.
5. Плеханов О.С. Радиоволновой контроль динамических перемещений. Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во ОАО «Институт критических технологий», 2017. Вып. 23. С. 14 – 20.
6. Справочник: Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В.В. Ключева: в 8 т. М.: Машиностроение, 2008. Т. 3. 864 с.
7. Справочник: Неразрушающий контроль. Оптический контроль / под общ. ред. В.В. Ключева: в 8 т. М.: Машиностроение, 2008. Т. 6. 842 с.
8. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208с.
9. Лаборатория физических основ и технологий беспроводной связи // Курсы и учеб. пособия // Волны в линиях передачи. [Электронный ресурс] URL: https://wl.unn.ru/study/courses/ElDyn_G&M/PDF/Part1.pdf (дата обращения 27.03.2022). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» // Курсы и учеб. пособия // Волны в волноводах. [Электронный ресурс] URL: <https://ee.kpi.ua/~fedyay/TP/5rus.pdf> (дата обращения 09.07.2021). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
11. Семёнов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.
12. Мейнке Х., Гундлах Ф.В. Радиотехнический справочник. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1.
13. Константинов В.А., Трубников С.Г. Измерение малых перемещений и вибраций радиотехническими методами // Метрология. 1972. №5. С. 16 – 23.
14. Griffin D.W. MW interferometers for biological studies // Microwave Journal. 1978. Vol. 21, N 5. P. 69 – 72.
15. Pudalov V.M., Khaikin M.S. Dilatometer with a sensitivity of 10^{-4} Angstrom // Cryogenics. 1969. Vol 9, N 2. P. 128 – 130.
16. Svennebrink J. Microwave equipment for detecting small length changes, as for metallography and seismology // Proceedings of the European microwave conference. Stockholm. 1971. Vol. 2. P. C9/4:1 – C9/4:4.
17. Щелкунов К.Н., Аляхов Е.К. Измерение вибраций и других малых перемещений с помощью клистрона-автодина // Тр. ЛИТМО (Ленинград, Институт точной механики и оптики). Сб. работ по электрорадиотехническим расчётам и измерениям 1959. Вып. 29. С. 125 – 129.
18. Сидоренко А.Б., Шаронин В.Г., Стародынов В.И. Дистанционное измерение скорости перемещения преград по пространственному состоянию электромагнитного поля. Измерительная техника. 1974. №10. С.94.
19. ГОСТ Р 8.875-2014. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами в диапазоне частот от 0,1 МГц до 65 ГГц.
20. Коломейцев Ф.И., Быстряков Н.П., Снежко Е.М., Харагай Е.И. СВЧ

установка для измерения вибраций. Измерительная техника, 1971, №11. С 45 – 46.

21. Пат. 2025669 Российская Федерация. Кл. G 01M 9/00, 1991.
22. Пат. 2082114 Российская Федерация. Кл. G 01H 9/00, 1994.
23. Пат. 17806 Российская Федерация. Устройство для измерения вибраций / А.А. Никитин, В.Н. Слонов. Заявка № 2001102462/20 от 29.01.2001; опубл. 27.04.2001, Бюл. № 12.
24. Николаенко А. Ю., Львов А. А., Львов П. А., Глухова О. М. Разработка аппаратного и программного обеспечения бесконтактного измерителя линейных перемещений и вибраций на основе многополюсного рефлектометра // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4.