

Санкт–Петербургский государственный университет

БАЙНОВА Екатерина Олеговна

Выпускная квалификационная работа
Управление системой акустической левитации

Уровень образования: бакалавриат

Направление 02.03.02

«Фундаментальная информатика и информационные технологии»

Основная образовательная программа СВ.5003.2016

«Программирование и информационные технологии»

Научный руководитель:
заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем,
д.ф. - м.н., профессор Веремей Евгений Игоревич

Рецензент:
Горицков Петр Никитич

Санкт-Петербург
2020 г.

Содержание

Введение	3
Постановка задачи	4
Обзор литературы	4
Глава 1. Построение математической модели	6
Глава 2. Практическая реализация	9
2.1. Аппаратная реализация	9
2.2. Управление звуковой волной	10
2.3. Определение местоположения объектов	14
Глава 3. Эксперименты	17
Выводы	20
Заключение	21
Список литературы	22

Введение

В последнее время активно развиваются технологии бесконтактной передачи физического воздействия на различные объекты. В зависимости от способа передачи воздействия можно выделить следующие типы систем:

- оптические ловушки применяются в биомедицине для перемещения объектов с размерами порядка микрометров;
- магнитное поле используется в транспорте на магнитной подушке и для стабилизации плазмы в токамаках;
- акустические волны могут быть использованы для перемещения в пространстве относительно небольших и легких объектов или капель жидкости.

Последняя технология представляет особый интерес, поскольку не требует особых свойств от перемещаемого объекта. Удерживание объектов в пространстве достигается за счет силы акустического давления, которая уравнивает силу тяжести. В качестве применений можно выделить размещение электронных компонентов для поверхностного монтажа [1][2], кулинарные эксперименты [3], либо имитацию тактильных ощущений в технологиях голографии [4]. Также в настоящее время на передний план выходят захваты для роботов-манипуляторов, удерживающие перемещаемые объекты за счет акустической левитации [5].

В зависимости от требуемого количества степеней свободы системы можно выделить различные конфигурации излучателей [6]:

- одноосевой левитатор, использующий излучатель и отражатель или два излучателя расположенных друг напротив друга (вместо них могут использоваться массивы излучателей);
- плоский двумерный массив излучателей с отражающей поверхностью, позволяющий манипулировать объектами в плоскости, параллельной плоскости массива;

- четыре плоских массива, расставленных по сторонам квадрата, позволяющие перемещать тела в трех направлениях.

В данной работе рассматривается задача построения первого варианта конфигурации системы с двумя излучателями, расположенными друг напротив друга. В частности, решается задача управления положением левитируемых объектов и определения их местоположения.

Постановка задачи

Целью данной работы является построение программно-аппаратного комплекса для управления системой одноосевой акустической левитации. Задача подразделяется на следующие этапы:

- Построение математической модели, описывающей силу, действующую на частицы в акустическом поле и давление, создаваемое звуковой волной в зависимости от заданных параметров.
- Сборка устройства, позволяющего генерировать звуковую волну с заданными параметрами.
- Реализация программного обеспечения для управления устройством.

Третий этап включает в себя следующие задачи:

- Создание программы для микроконтроллера, позволяющей воспроизводить звуковые волны с определенными характеристиками, а также осуществлять обмен данными с внешним компьютером через последовательный порт.
- Написание программы с графическим интерфейсом для внешнего компьютера, позволяющей управлять генерацией звуковых волн, а также определяющей и отображающей местоположение узлов стоячей акустической волны и левитируемых объектов при помощи видеокамеры.

Обзор литературы

В [6] описываются принципы работы оптических и акустических ловушек. Рассматриваются их области применения, а также оба подхода сравниваются между собой. К недостаткам оптических ловушек авторы относят необходимость использования излучения с высокой плотностью, что может приводить к повреждению или изменению свойств образца. Помимо этого, этот метод позволяет манипулировать только одиночными частицами размером не более нескольких десятков микрон. Также для таких систем не решен вопрос перемещения объектов в пространстве. Всех этих недостатков лишены системы акустической левитации.

В [7] исследуется акустическая левитация жидкости с использованием одноосевой конфигурации с одним преобразователем и отражающей поверхностью. В работе строится математическая модель, в которой рассчитывается акустическое давление, силы действующие на капли и форма последних. Также проводятся эксперименты и сравнение экспериментальных данных с составленной моделью. Полученные результаты демонстрируют, что помещение капель в акустическое поле излучателя вызывает изменение резонансной частоты системы, а также, что поведение удерживаемых частиц зависит от того, на какой частоте работает устройство: выше или ниже резонансной. В частности, если частота выше резонансной, то капли не распадаются и удерживаются с большей силой.

Похожая система реализована в [2], но вместо одного излучателя и отражателя авторы рассматривают систему из двух массивов излучателей в различных конфигурациях. В работе проводятся различные эксперименты с целью исследования возможностей системы. По результатам работы выясняется лучшая конфигурация системы – два массива излучателей, фокусирующих звук путем изменения поворота излучателей и расстояния между ними. Такая система, при частоте звука 40 кГц и потребляемой мощности 10 Вт, может захватывать объекты плотностью до 2.2 г/см^3 и диаметром до 4 мм. В работе также демонстрируется удерживание различных объектов: капель воды, электронных компонентов, насекомых.

До сих пор на размеры левитируемых объектов накладывалось ограничение по размерам. Диаметр образцов не мог превышать половины длины волны. В [8] авторы демонстрируют систему, позволяющую удерживать в воз-

духе объекты размером много больше половины длины волны. В частности, в статье поднимается шар полистирола диаметром 50 мм, что соответствует 3.6 длины волны при частоте 25 кГц.

В [9] описывается метод, позволяющий вычислить величину средних сил, которые действуют на частицу в произвольном акустическом поле. Размеры частицы принимаются много меньшими длины волны. В качестве среды рассматривается идеальная жидкость.

Глава 1. Построение математической модели

Упругие, или механические, волны — это механические возмущения, распространяющиеся в упругих средах. Такие волны зачастую называют звуковыми, поскольку человеческими органами слуха они воспринимаются как звук. Звуковые волны являются продольными и по мере распространения создают области повышенного и пониженного давления. При интерференции двух движущихся в противоположном направлении волн с одинаковой частотой возникает стоячая волна (рис. 1) — колебательный процесс, для которого характерно формирование чередующихся максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды с устойчивым положением в пространстве [10].

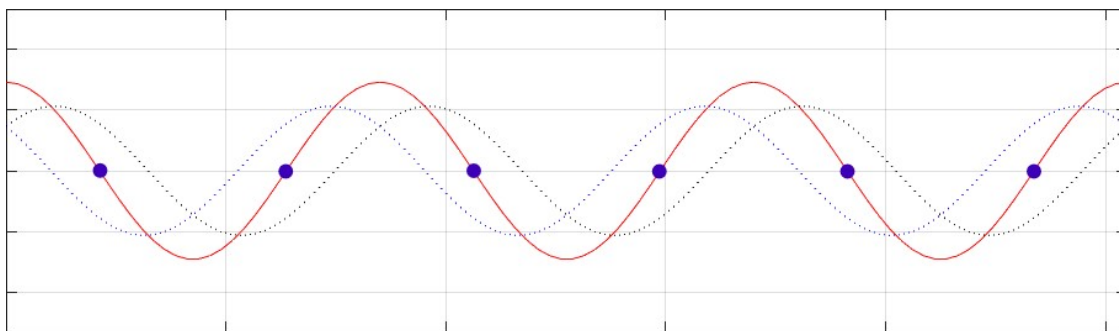


Рис. 1: Пример стоячей волны (красный цвет), образованной наложением двух гармонических волн (пунктирные линии) одинаковой частоты и амплитуды (направление распространения волн противоположно). Синими точками помечены узлы – области, в которых амплитуда равна нулю.

Бегущая плоская волна описывается уравнением

$$y(\vec{r}, t) = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t + \varphi_0),$$

где $A = const$ – амплитуда волны, \vec{k} – волновой вектор, $\vec{r} = (x_1, x_2, \dots)$ – координаты точки пространства, t – время, ω – циклическая частота, φ_0 – начальная фаза.

Стоячая плоская волна выражается через уравнение

$$y(\vec{r}, t) = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0) \cos(\omega t + \hat{\varphi}_0),$$

где A – амплитуда волны, φ_0 и $\hat{\varphi}_0$ – фазы бегущих волн.

Стоячие волны в пространстве можно описывать как через смещение частиц пространства, так и через изменение давления. В точках, где смещение равно нулю, амплитуда колебаний давления максимальна. На рис. 2 наглядно демонстрируется зависимость изменения давления от смещения частиц.

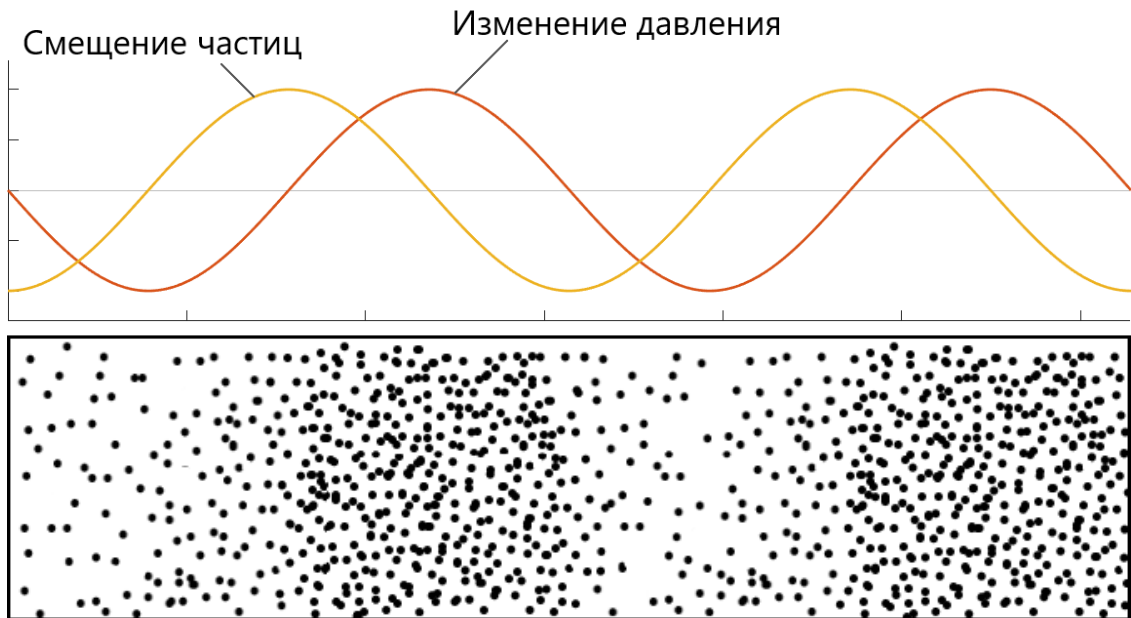


Рис. 2: Пример стоячей волны. Разница фаз волн описывающих смещение частиц (красная) и изменение давления (черная) равна $\pi/2$.

Таким образом, стоячая волна в пространстве представляет собой области с высокой и низкой амплитудой изменения давления. Объект, помещенный в звуковое поле стоячей волны, подвергается акустическому излучению, сила притяжения действующая на него уравнивается и тело зависает.

Для расчета акустического давления можно использовать формулу [2]

$$P(\vec{r}) = P_0 V_{pp} \frac{D_f(\theta)}{d} e^{i(\varphi + kd)}, \quad (1)$$

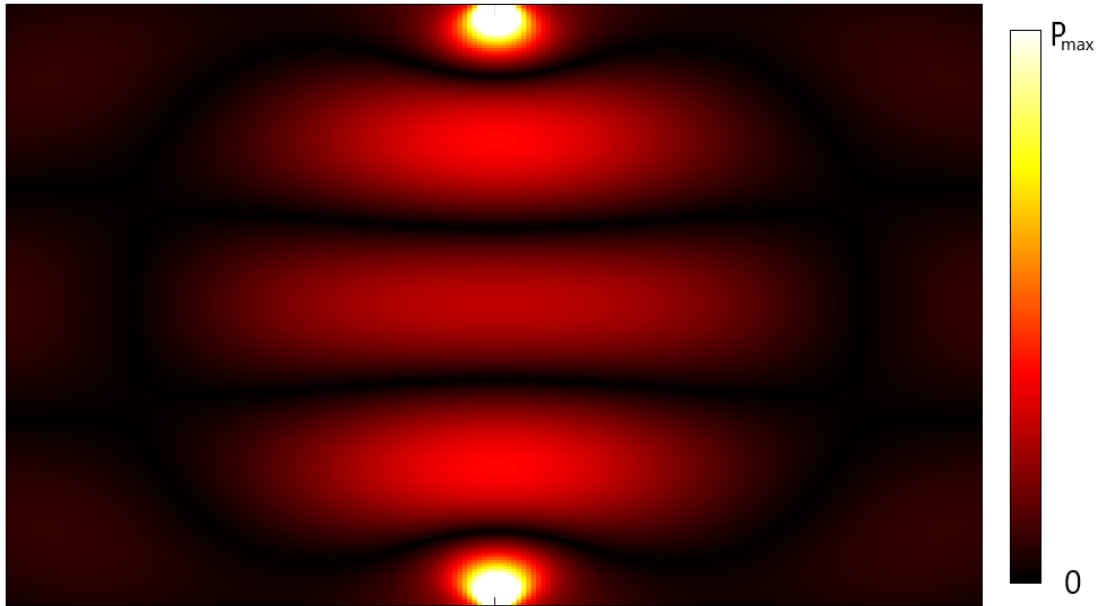


Рис. 3: Модуль действительной части акустического давления при $\varphi = 0$. Расстояние между излучателями равно 2λ . Красные и белые области – области с высокой амплитудой изменения давления, черные – с низкой. Частицы собираются в зонах, где амплитуда изменения давления равна или близка к нулю.

где P_0 – константа, задающая мощность излучателей, V_{pp} – пиковое напряжение исходящего сигнала, d – длина вектора \vec{r} , k – волновое число, λ – длина волны, φ – фазовый сдвиг, D_f – функция, зависящая от угла θ между нормалью к излучателю и вектором \vec{r} . В данном случае

$$D_f = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta},$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода, a – радиус излучателя.

С использованием пакета MATLAB и формулы (1) была построена модель, показывающая амплитуду колебаний давления при заданных параметрах (рис. 3). Давление рассчитывается отдельно для двух бегущих волн, а затем складывается.

Для того чтобы рассчитать силу, действующую на частицы, использовались результаты, полученные Горьковым в [9]:

$$F = -\nabla U, \quad (2)$$

$$U = 2\pi R^3 \rho \left(\frac{\overline{p_{\Pi}^2}}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{\overline{v_{\Pi}^2}}{2} f_2 \right), \quad (3)$$

где $\overline{p_{\Pi}^2}$ и $\overline{v_{\Pi}^2}$ – усредненные значения квадрата колебаний давления и скорости частиц соответственно, R – радиус частицы,

$$f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_0^2 \rho_0}, \quad f_2 = \frac{2(\rho_0 - \rho)}{2\rho_0 + \rho},$$

ρ и ρ_0 – плотность среды и частицы, c и c_0 – скорость звука в среде и частице.

С использованием формул (2) и (3) и программного обеспечения COMSOL Multiphysics была получена модель, демонстрирующая смещение частиц (рис. 4) в пространстве.

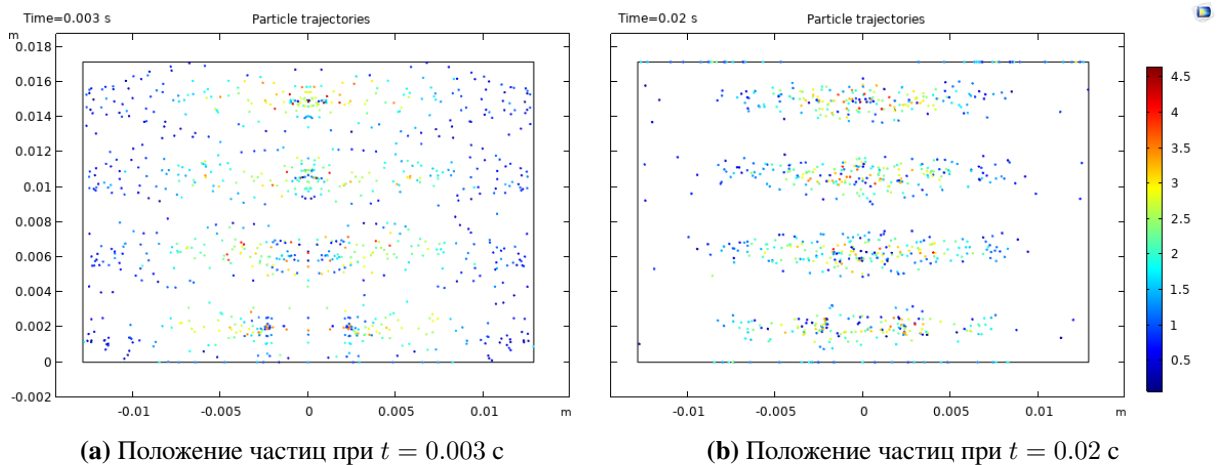


Рис. 4: Смещение частиц пространстве. Цветом обозначена мгновенная скорость частиц в м/с.

Глава 2. Практическая реализация

2.1 Аппаратная реализация

Наиболее распространенным и простым устройством систем акустической левитации является одноосевая конфигурация, которая подразделяется на два типа [6]. Первый тип использует излучатель и отражатель звука. Отражающая поверхность располагается на таком расстоянии от излучателя и имеет такую форму, чтобы при отражении волны формировалась стоячая

волна. Второй тип использует два излучателя, расположенных друг напротив друга. В данной работе применялся второй тип системы.

Для решения поставленной задачи было использовано следующее оборудование: отладочная плата Arduino Uno, драйвер моторов TB6612FNG, два ультразвуковых излучателя, снятых с ультразвукового дальномера HC-SR04. Схема подключения приведена на рис. 5. Изображение готовой системы приведено на рис. 6

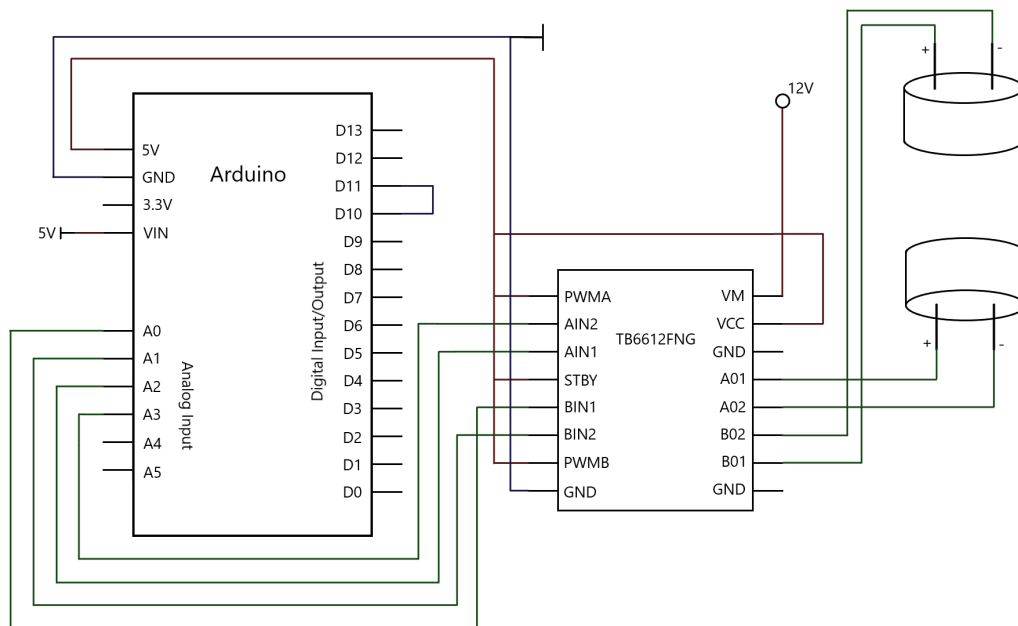


Рис. 5: Схема подключения. Arduino подключается к компьютеру через USB-порт.

2.2 Управление звуковой волной

Для решения первой задачи – генерации стоячей волны – необходимо генерировать сигнал определенной частоты и расположить излучатели на расстоянии, кратном $\lambda/2$ друг от друга, где λ - это длина волны.

Резонансная частота ν излучателей равна 40 ± 1 кГц. Тактовая частота используемого микроконтроллера равна 16 МГц. Количество тактов для настройки работы таймера

$$n = \frac{16 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^4 \cdot 2} = 200.$$



Рис. 6: Система собрана с использованием Arduino Uno, драйвера TB6612FNG и двух ультразвуковых излучателей. На узлах стоячей волны расположены шарики пенопласта.

Умножение на 2 в знаменателе обусловлено тем, что за один период сигнал должен меняться дважды. Через каждые n тактов сигнал инвертируется. Таким образом генерируется меандр с частотой 40 кГц.

Несмотря на то, что создаваемая волна имеет квадратную форму, волна, получаемая на выходе излучателей будет иметь синусоидальную форму. На рис. 7 приведен пример, в котором демонстрируется как сгенерированный сигнал влияет на формирование волны на выходе динамика. Для генерации волны и отслеживания сигналов использовался Digilent Analog Discovery 2. В качестве микрофона использовался один из ультразвуковых датчиков.

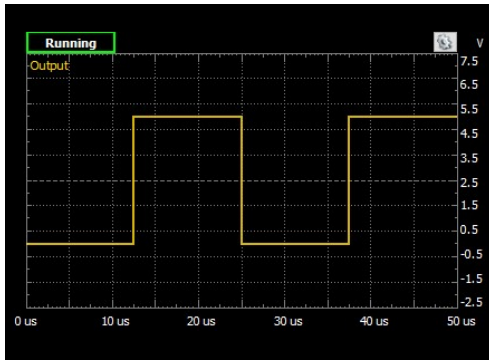
На изображениях видно, что как сигнал, полученный на выходе драйвера, так и сигнал, полученный с микрофона, почти не меняются в зависимости от входного сигнала.

Длина волны зависит от скорости звука в среде и частоты волны. Скорость звука в воздухе при температуре 20°C равна $c_0 = 343$ м/с. Длина волны в таком случае равна

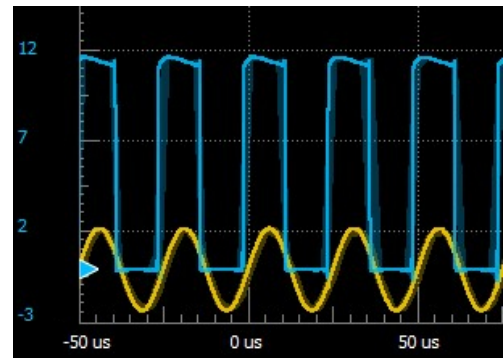
$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} = 8.575 \text{ мм.}$$

Таким образом, излучатели должны располагаться друг от друга на расстоянии, кратном 4.2875 мм.

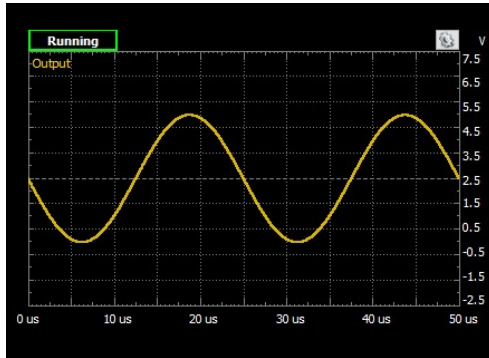
Для того, чтобы изменять фазу волны был сформирован массив раз-



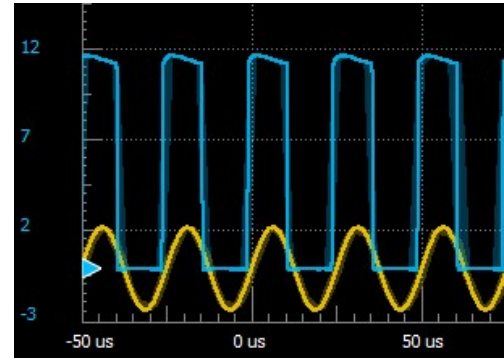
(a) Сгенерированный сигнал квадратной формы



(b) Выходной сигнал для квадратной волны



(c) Сгенерированный сигнал синусоидальной формы



(d) Выходной сигнал для синусоидальной волны

Рис. 7: Выходной сигнал, сформированный при генерации волн разных форм. Голубым цветом обозначен сигнал на выходе драйвера. Желтым - сигнал полученный микрофоном

мера $[24 \times 24]$, задающий множество последовательностей сигналов, формирующих волну с определенным фазовым сдвигом. Каждый элемент массива представляет собой четыре бита, каждый из которых означает какой сигнал подать на выводы излучателей. Например, если в ячейке записано число $0x5 = 0b0101$, то на минус верхнего излучателя подается 0, на плюс единица, на плюс нижнего ноль и на минус нижнего единица. За один период через равные промежутки времени на излучатели последовательно подаются сигналы из одной строки массива. Такой же метод использовался в [2]. На рис. 8 продемонстрирован пример генерируемой волны. Таким образом имеется 24 дискретных состояния системы.

Выбор именно такого размера массива обусловлен несколькими факторами:

1. Каждая ячейка массива принимает одно из четырех значений, описывающих выходной сигнал. В связи с этим размер массива должен быть

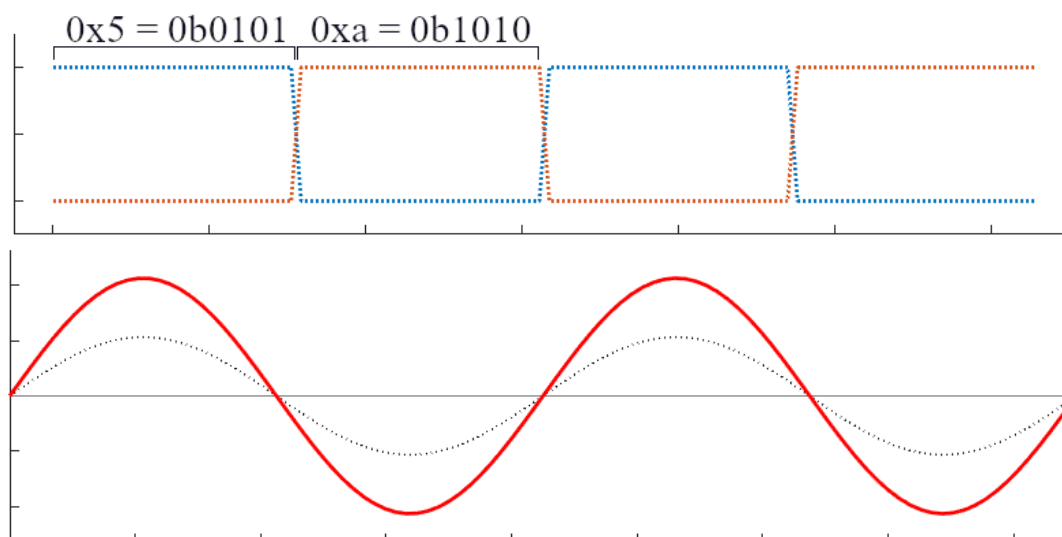


Рис. 8: Пример сигнала, генерируемого строкой массива {0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0x5, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa, 0xa} и получаемой стоячей волны. На нижнем изображении $t = 0$.

кратен четырем. Иначе строку нельзя будет поделить поровну и у полученного сигнала высокий и низкий уровень напряжения будут длиться неравные промежутки времени

2. Если выбрать слишком маленькое значение, то перемещение узлов станет слишком резким
3. Слишком большое значение уменьшает свободное время работы процессора, которое далее используется для обмена данными с компьютером

Для обмена данными между микроконтроллером и компьютером использовался виртуальный СОМ-порт. Для обеспечения необходимой скорости работы программы микроконтроллера вместо вызова библиотечных функций осуществлялась работа с управляющими регистрами напрямую. Четыре раза в секунду производится проверка на наличие новых данных и их считывание. Для отправки данных необходимо дождаться опустошения регистра данных и произвести отправку.

Данные, которые отправлялись с микроконтроллера на компьютер, представляли собой числа от 0 до 23 и означали текущую фазу волны. Данные, отправляемые на Arduino, содержали 1 байт, где каждый бит означает

отдельную команду. Список команд следующий:

1. 0b00000001 – включить систему,
2. 0b00000010 – выключить систему,
3. 0b00000100 – перемещать узлы вниз,
4. 0b00001000 – вернуться к исходному положению,
5. 0b00010000 – перемещать узлы вверх,
6. 0b00100000 – остановить движение узлов,

В зависимости от полученной команды, на контроллере происходит изменение сигнала, подаваемого на излучатели. Команда 1 прерывает действие команды 2, в остальных случаях она не влияет на работу программы. Команды 3–6 выполняются до тех пор, пока не поступит любая другая команда 2–6, которая также выполняется пока не поступит другая. Когда действует команда 2, команды 4–6 не могут выполняться.

Программа для Arduino написана на языке C++ в среде разработки Arduino IDE. Также, для удобства управления, было реализовано приложение с графическим интерфейсом для внешнего компьютера. Для разработки использовался язык C++ и фреймворк Qt. Интерфейс представляет собой несколько кнопок, каждая из которых отправляет на микроконтроллер соответствующие команды, и окно, в котором отображается смоделированное акустическое давление и местоположение объектов. Внешний вид программы приведен на рис.9.

2.3 Определение местоположения объектов

Последним этапом является определение местоположения объектов на узлах волны. Для решения этой задачи было решено использовать камеру. На видеопотоке должны быть зафиксированы оба излучателя и область, в которой располагаются объекты. Программа реализовывалась на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV.

Задача делится на два этапа:

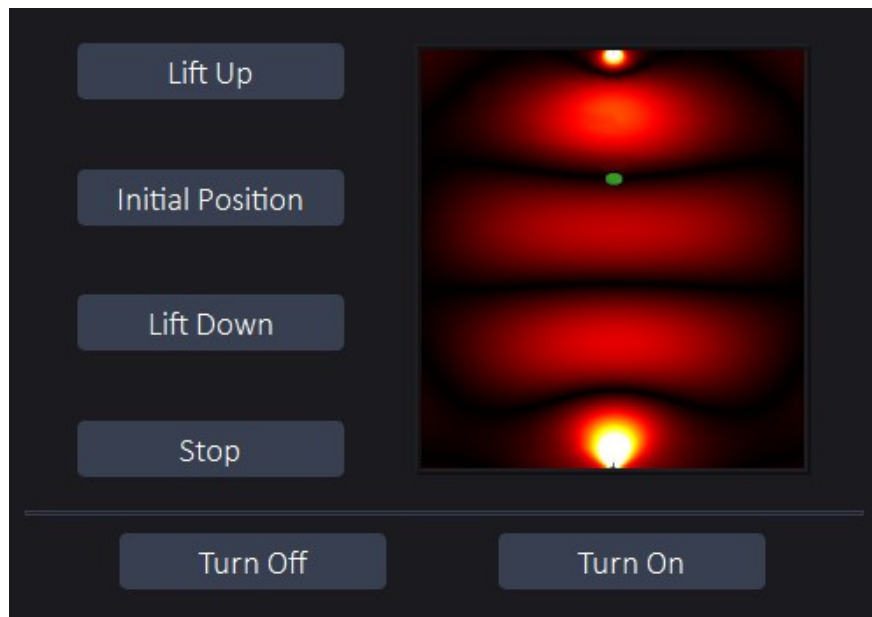


Рис. 9: Графическая оболочка приложения. Зеленые точки означают что на данных узлах располагаются объекты.

- Определение местоположения узлов
- Определение местоположения объектов на узлах

Поскольку масштаб изображения заранее неизвестен, в качестве ориентиров использовались цветные метки – полоски яркого цвета шириной 1 см. Метки были нанесены на излучатели, что также помогало решить проблему измерения расстояния между излучателями.

При запуске программы делается снимок изображения с камеры. Поскольку программа только запущена, на снимке не должны присутствовать левитируемые объекты. Далее это изображение называется фоновым.

В цикле считывается изображение с камеры и обрабатывается. Для того чтобы небольшие изменения положения камеры не влияли на работу алгоритма, используется стабилизация изображения. Фоновое изображение и текущий кадр преобразовываются в черно-белые. С помощью функции `OpenCV goodFeaturesToTrack()`, метод работы которой описан в [11], извлекаются признаки фонового изображения. Эти признаки представляют собой координаты пикселей, по которым, с использованием функции `OpenCV calcOpticalFlowPyrLK()`, вычисляется выборочный оптический поток. Эта функция использует итеративный алгоритм Лукаса – Канаде с пира-

мидой изображений.

Для определения местоположения узлов используется следующий алгоритм:

1. Конвертировать фоновое изображение из цветовой схемы BGR в HSV.
2. С использованием функции `cv::inRange()` создать маску, в которой белым цветом выделено местоположение меток.
3. Применить к маске операцию эрозии.
4. Применить к маске операцию наращивания.
5. Найти координаты верхних и нижних точек выделенных областей расположенных по их центру. Имеем вектор

$$((x_{ctr}, y_{tt}), (x_{ctr}, y_{tb}), (x_{ctr}, y_{bt}), (x_{ctr}, y_{bb})) \quad (4)$$

координат верхней границы верхней метки, нижней границы верхней метки, верхней границы нижней метки и нижней границы нижней метки соответственно.

6. Найти количество пикселей в одной длине волны по формуле

$$\lambda_{px} = \frac{\lambda(y_{tt} - y_{tb} + y_{bt} - y_{bb})}{2l},$$

где $l = 10$ высота метки в мм.

7. Вычислить количество узлов

$$N = \left[\frac{2(y_{tb} - y_{bt})}{\lambda_{px}} \right] - \sigma,$$

где $\sigma = 0$ если фазовый сдвиг кратен π , и $\sigma = 1$ иначе.

8. Координата x всех узлов равна x_{ctr} . Найти координаты y по формуле

$$y_i = \left[y_{tb} + \frac{\lambda_{px}}{2}(i + \varphi) \right], \quad i = \overline{1, N},$$

где $\varphi = i/N + 0.5$.

Алгоритм определения местоположения левитируемых объектов следующий:

1. Найти поэлементную абсолютную разность между фоновым изображением и стабилизированным кадром.
2. Методом пороговой бинаризации на полученном изображении выделить области с высоким показателем интенсивности. Этот этап применяется не ко всему изображению, а только к области между излучателями, для того чтобы избежать лишних шумов.
3. В цикле поочередно для каждого узла выделить прямоугольную область с координатами верхнего левого угла и правого нижнего угла

$$(x_{tl}, y_{tl}) = (0, y_0 - \delta),$$

$$(x_{br}, y_{br}) = (w, y_0 + \delta),$$

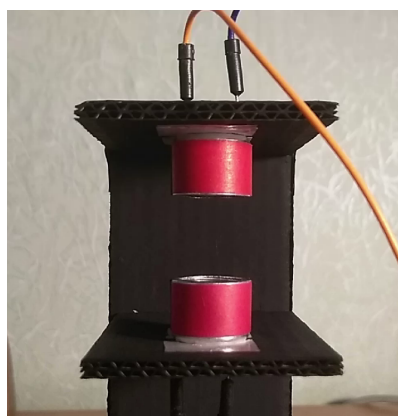
где w – ширина изображения, δ – параметр, задающий ширину области и зависящий от размера изображения, по умолчанию $\delta = 2$, (x_0, y_0) – координаты узла.

Данный алгоритм предполагает, что картинка почти статична. Допускаются небольшие дрожания видео. Пример работы программы можно увидеть на рис. 10 и рис. 11. С исходным кодом можно ознакомиться по ссылке [12].

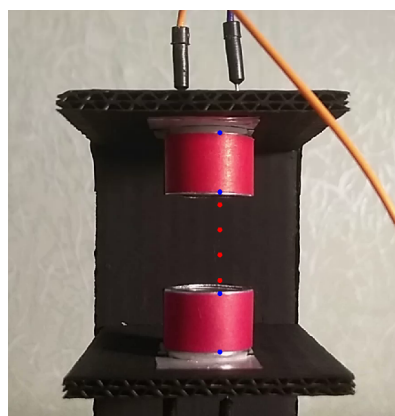
Глава 3. Эксперименты

В качестве экспериментов тестировались стабильность системы, виды материалов и размеры объектов, с которыми могла работать система.

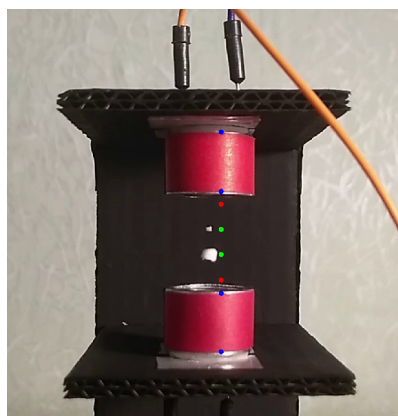
При расстоянии между излучателями 2λ получилось удержать 2 бумажных диска плотностью 80 г/м^2 и диаметром 3 миллиметра или 4 пенопластовых шарика (плотность $15\text{-}25 \text{ кг/м}^3$) диаметром до 3 мм. При расстоянии 3λ же количество шариков увеличилось до 6. То есть все узлы в обоих случаях были заняты.



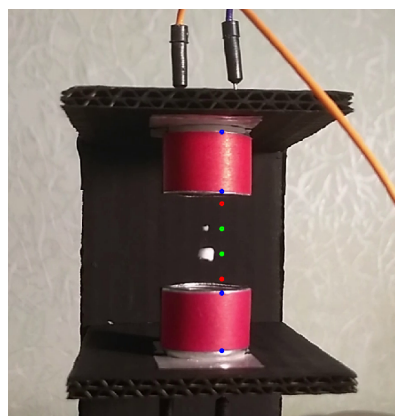
(a) Фоновое изображение.



(b) Кадр без объектов.



(c) Кадр с объектами без смещений камеры.

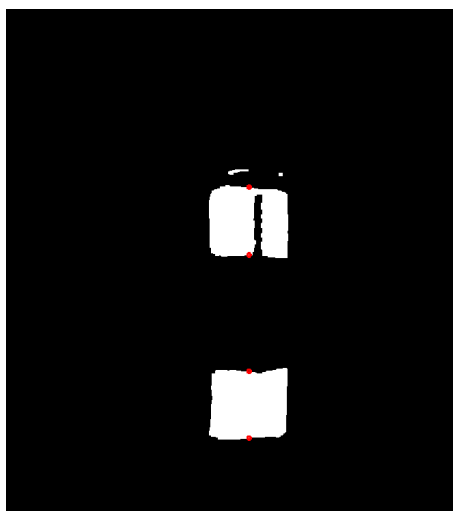


(d) Кадр с объектами со смещением камеры.

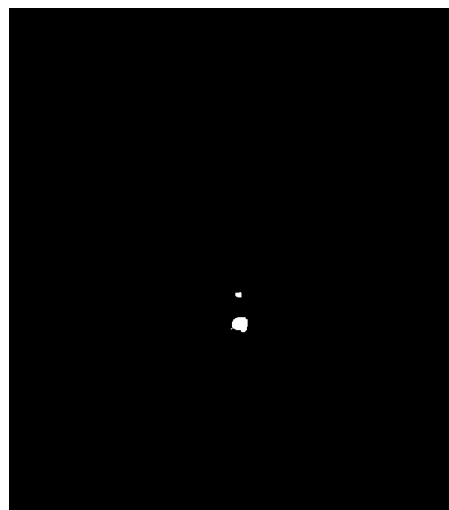
Рис. 10: Пример работы программы. Синие точки – координаты из (4). Красные и зеленые точки означают пустые и занятые узлы. На изображении 10d видно, что даже при смещении камеры система работает стабильно.

При перемещении узлов возникла проблема: траектория движения была слишком искривлена. Из-за этого объекты падали. Предположительно, это связано с отражениями от стенок корпусов излучателей. После их удаления траектория почти совпала с прямой линией, но ослабилась удерживающая сила.

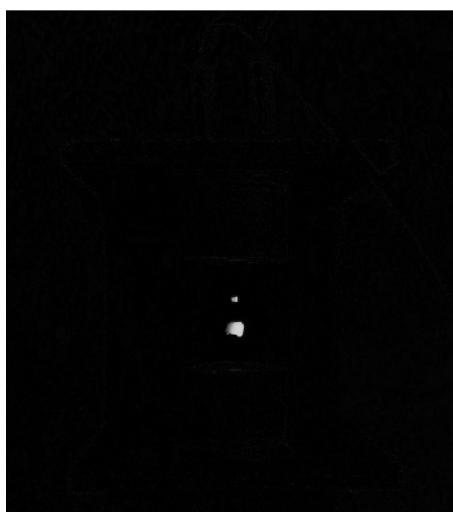
Стабильность исследовалась при расстоянии между излучателями, равном 2λ . Стойка, на которой установлены излучатели, подвергалась колебаниям. При небольшой скорости частицы не падали и не вылетали из рабочей области. Также стойка вращалась в различных направлениях. Когда она повернута горизонтально, пенопластовые шарики размером до 2 мм удерживаются, бумага и шарики больших размеров падают. Также после удаления корпусов излучателей при повороте не удерживались даже маленькие шарики. Систе-



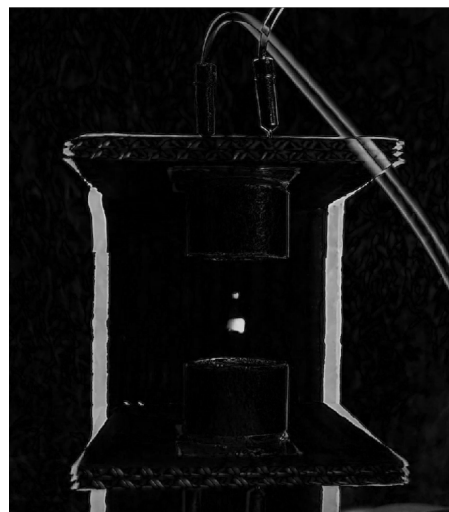
(a) Маска меток излучателей. Красные точки – координаты из (4).



(b) Маска объектов.



(c) Разница между фоновым изображением и кадром без смещения камеры. Белые области – объекты.



(d) Разница между фоновым изображением и кадром со смещением камеры.

Рис. 11: Пример работы программы.

ма стабильно работала на протяжении 8 часов, объекты статично висели в воздухе и не падали.

При использовании камеры с разрешением 1920 на 1080 пикселей программа, определяющая местоположение объектов, работала с частотой 7 кадров в секунду. В состоянии покоя погрешность по высоте составила 2 пикселя (около 0.17 мм). При разрешении 640 на 480 частота составила 20 кадров в секунду, погрешность также 2 пикселя (примерно 0.5 мм). Для тестирования использовался ноутбук Acer Aspire E5-553G-T2DM (процессор AMD A10 9600P, видеокарта Radeon R7 M440).

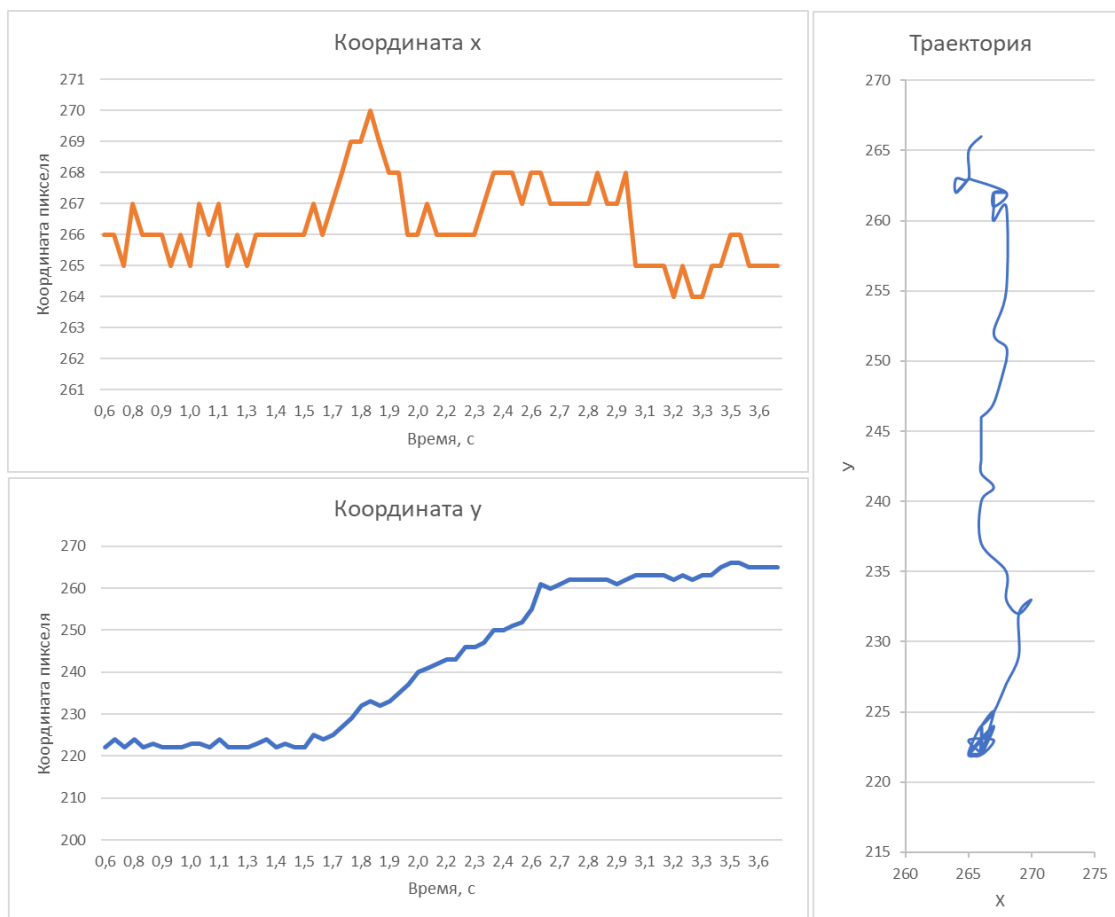


Рис. 12: Изменение координат объекта при движении и в неподвижном положении. На графиках указаны координаты пикселей на изображении при разрешении 640×480 . На графиках видно, что имеются шумы по обоим координатам, связанные с шумами на изображении. Кривизна траектории движения объясняется недостаточно точной настройкой оборудования и наличием возмущений внутри системы и со стороны окружающей среды.

На рис. 12 показана динамика изменения координат объекта при перемещении.

Выводы

В работе рассмотрена задача построения системы управления одноосевой акустической левитацией. Построены математические и компьютерные модели, описывающие поле акустического давления и траекторию движения частиц, помещенных в акустическое поле стоячей волны. Реализован программно-аппаратный комплекс, позволяющий удерживать и перемещать в воздухе шарики пенопласта и листочки бумаги диаметром до 3 мм, а также измерять положение левитируемых объектов. Система компьютерного зрения требует наличия интенсивного статичного освещения и практически статич-

ного фона, но в заданных условиях распознавание происходит с достаточной точностью.

К недостаткам системы можно отнести требования к плотности и размеру левитируемых объектов. На практике размер объектов не превышает трети длины волны. Увеличить требуемый размер можно за счет изменения частоты излучателей, но при этом также необходимо увеличение мощности, за счет чего можно также поднимать более тяжелые тела. Помимо этого, ближайшие направления исследований – реализация более сложных конфигураций системы в виде набора из нескольких излучателей для обеспечения возможности перемещения объектов в пространстве по сложным траекториям.

Заключение

В ходе исследований, проведенных при написании выпускной квалификационной работы, получены следующие результаты, которые выносятся на защиту:

- Построены математические модели траекторий движения частиц при воздействии акустического давления.
- Реализован аппаратный комплекс акустической левитации, состоящий из двух ультразвуковых излучателей, расположенных друг напротив друга.
- Написано программное обеспечение для управления системой и визуализации расположения левитируемых объектов.
- Проведен ряд экспериментов, демонстрирующих работоспособность программно-аппаратного комплекса.

Список литературы

- [1] Marco A. B. Andrade, Tiago S. Ramos, Julio C. Adamowski, Asier Marzo Contactless pick-and-place of millimetric objects using inverted near-field acoustic levitation // Applied Physics Letters. 2020. №116. С. 054104.
- [2] Asier Marzo, Adrian Barnes, Bruce W. Drinkwater TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator // Review of Scientific Instruments. 2017. №88. С. 085105.
- [3] Meet TastyFloats, A Food Levitation System // The Spoon URL: <https://thespoon.tech/researchers-create-food-levitation-system-because-they-can/> (дата обращения: 03.06.2020).
- [4] Benjamin Long, Sue Ann Seah, Tom Carter, Sriram Subramanian Rendering Volumetric Haptic Shapes in Mid-Air Using Ultrasound // ACM Trans. Graph.. 2014. №33. С. 181.
- [5] Robotic gripper uses acoustic levitation for contact-free manipulation // New Atlas URL: <https://newatlas.com/science/robotic-manipulator-ultrasonics-acoustic-levitation-contactless-gripper/> (дата обращения: 03.06.2020).
- [6] Минин Игорь Владиленович, Минин Олег Владиленович. Оптические и акустические ловушки // Вестник СГУГиТ. 2017. №22. С. 194-214.
- [7] Marco A. B. Andrade, Asier Marzo Numerical and experimental investigation of the stability of a drop in a single-axis acoustic levitator // Physics of Fluids. 2019. №31. С. 117101.
- [8] Marco A. B. Andrade, Anne L. Bernassau, Julio C. Adamowski Acoustic levitation of a large solid sphere // Applied Physics Letters. 2016. №109. С. 044101.
- [9] Л. П. Горьков О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // Докл. АН СССР. 1961. №140 С. 88-91.

- [10] С. Н. Ржевкин Курс лекций по теории звука. Москва: Издательство Московского университета, 1960.
- [11] Jianbo Shi, Carlo Tomasi Good features to track // 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1994. С. 593-600.
- [12] Репозиторий с исходным кодом // URL: <https://github.com/Aizeren/acoustic-levitation-system-control> (дата обращения: 03.06.2020).