

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.5>

УДК: 53.083.2

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫЙ ТОМОГРАФ, ДОСТУПНЫЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ В НЕСТАНДАРТНЫХ УСЛОВИЯХ

А. В. Корженевский

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11-7**

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2021 г.

Аннотация. Цель работы – представить первые результаты разработки электроимпедансного томографа, собираемого из готовых блоков, со свободным программным обеспечением. Электроимпедансная томография рассматривается как возможная альтернатива и дополнение к компьютерной томографии при диагностике легких. Одной из проблем на этом пути является взаимная малодоступность аппаратуры приемлемого уровня для врачей-исследователей и контактов с такими медиками для ее разработчиков. В качестве варианта для использования исследователями-энтузиастами, не обладающими достаточным опытом для самостоятельной разработки аппаратуры и программного обеспечения и средствами для покупки дорогостоящих коммерческих приборов, разработана и испытана легко воспроизводимая из готовых модулей аппаратная платформа ЭИТ и программное обеспечение с открытым исходным кодом. Для реализации основных элементов измерительной системы используется оценочная плата для интегрального измерителя биоимпеданса, выпускаемая производителем микросхемы. 16-канальные мультиплексоры также доступны в виде готовых модулей. Для высокопроизводительного модуля управляющего контроллера на основе 32-битной системы на кристалле ESP32 со встроенными беспроводными интерфейсами имеется компилятор, портированный в среду Ардуино. Это делает доработку и тестирование встроенного программного обеспечения возможными для непрофильных специалистов. Алгоритмы

реконструкции изображений доступны онлайн на сервере Института. Возможны как динамическая (визуализация только изменений), так и статическая визуализация. Результаты тестирования томографа на фантоме и на теле человека продемонстрировали высокое качество получаемых данных. Актуальной задачей остается повышение быстродействия измерительной системы и расширение функций программного обеспечения, включая использование беспроводных интерфейсов для передачи данных и прямое взаимодействие с сервером реконструкции изображений.

Ключевые слова: медицинская электроника, физиологические измерения, электрический импеданс, обратные задачи, диагностика легких.

Abstract. The objective of this work is to present the first results of the development of an electrical impedance tomography system assembled from ready-made blocks with free software. Electrical impedance tomography is considered as a possible alternative and adjunct to computer tomography in lung diagnostics. One of the problems along this path is the mutual inaccessibility of equipment of an acceptable level for research physicians and of contacts with such physicians for the developers. An easily reproducible EIT hardware platform from ready-made modules and open source software have been developed and tested as an option for enthusiastic researchers who do not have sufficient experience to independently develop the hardware and software and the means to purchase expensive commercial devices. An evaluation board for an integrated bioimpedance meter, produced by the chip manufacturer, is used to implement the main elements of the measuring system. The 16-channel multiplexers are also available as ready-made modules. A high-performance controller module based on a 32-bit ESP32 system-on-chip with built-in wireless interfaces is provided with a compiler and SDK ported to the Arduino environment. This makes customization and testing of the embedded software possible for non-core professionals. Image reconstruction algorithms are available online on the Institute's server. Both dynamic (visualization of changes only) and static imaging are possible. The results of tomography system testing on the phantom and on the human body demonstrated the high quality of the collected data. Improving the speed of the

measuring system and adding software functions, including the use of wireless interfaces for data transmission and direct interaction with the image reconstruction server are topical tasks.

Key words: medical electronics, physiological measurements, electrical impedance, inverse problems, lung diagnostics.

Введение.

Пандемия новой коронавирусной инфекции вызвала повышенный интерес к методам диагностики и визуализации легких. Основным способом оценки степени поражения легких является компьютерная томография (КТ). Ей присущи недостатки, такие как высокая доза облучения, делающая крайне нежелательными повторные обследования, необходимые для наблюдения динамики заболевания. Аппаратура для КТ громоздка и не всегда доступна. Одним из обсуждаемых методов – кандидатов для дополнения и замены КТ в случае динамических наблюдений, в труднодоступной местности или в домашних условиях является электроимпедансная томография (ЭИТ). В этом методе для зондирования тела вместо рентгеновского излучения используется слабый переменный электрический ток. Множество электродов, располагаемых на поверхности тела и образующих контур визуализируемого сечения, используется для пропускания тока и регистрации электрических потенциалов, вызываемых его протеканием. Полученные данные используются затем для визуализации пространственного распределения электрической проводимости тканей и органов внутри тела. Электропроводность, в частности, может существенно различаться у здоровой и пораженной ткани. Дополнительную информацию несет частотная дисперсия – зависимость электропроводности от частоты пропускаемого тока в многочастотной ЭИТ.

ЭИТ была предложена в 80-х годах прошлого века [1], и по ряду причин так и не стала доступным и широко используемым диагностическим методом. Большая часть разработок осталась на уровне лабораторных образцов. В частности, разработанный в начале 90-х годов в Институте радиотехники и

электроники РАН ЭИТ со статической визуализацией [2 - 4]. Имеются единичные коммерческие продукты, такие как российский электроимпедансный маммограф [5], швейцарский [6] или немецкий [7] динамические легочные томограф для палат интенсивной терапии. Такие системы достаточно дороги, не всегда способны обеспечить требуемую для диагностики коронавирусного поражения информативность (визуализацию статических структур, а не только изменений электропроводности в процессе дыхания) и мобильность. А главное, они малодоступны врачам-исследователям и экспериментаторам, занимающимся поисками новых методов диагностики и лечения. У врачей-энтузиастов часто нет доступа к новым приборам, а у разработчиков и инженеров – контактов с такими медиками

В качестве варианта для использования исследователями-энтузиастами, не обладающими достаточным опытом для самостоятельной разработки аппаратуры и средствами для покупки дорогостоящих коммерческих приборов, разработана и испытана легко воспроизводимая из готовых и доступных модулей аппаратная платформа ЭИТ и программное обеспечение с открытым исходным кодом. Имеется возможность онлайн реконструкции изображений по получаемым результатам измерений, как статической, так и динамической, на общедоступном веб-сервере. Для создания системы не требуется заказ печатных плат, пайка микросхем и других мелких компонент (минимальный навык пайки крупных элементов все же необходим). Беспроводная передача данных в сочетании с батарейным питанием обеспечивает необходимый уровень электробезопасности.

1. Аппаратная часть.

Основными элементами аппаратной части томографа являются программируемый биполярный источник переменного тока, высокоточный измеритель переменной разности потенциалов, четыре мультиплексора, обеспечивающих подключение каждого вывода источника и измерителя к любому электроду, расположенному на теле. Процесс измерения управляется

встроенным в прибор микроконтроллером, который также обеспечивает прием управляющих команд и передачу полученных данных на компьютер, где осуществляется реконструкция и вывод изображения. Блок-схема томографа приведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема аппаратной части томографа.

В описываемом варианте томографа используются источник тока и измеритель разности потенциалов, интегрированные в микросхеме измерителя биоимпеданса MAX30001. Точнее, в устройстве используется готовая оценочная плата для этой микросхеме, легко доступная для приобретения. На плате кроме самой микросхемы установлена вся необходимая обвязка и удобные для подключения внешних элементов разъемы. Источник тока позволяет инжектировать в тело ток прямоугольной формы с частотой от 0.125 до 131 кГц и амплитудой 8 – 96 мкА. Измеритель разности потенциалов состоит из синхронного детектора, аналоговых и цифровых фильтров и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрядностью 20 бит. Управление и передача данных осуществляются с помощью интерфейса SPI. Прилагаемый к плате модуль с микроконтроллером, к сожалению, малоприспособен для разработки, поскольку требует приобретения внешнего программатора и не имеет беспроводных интерфейсов.

Одним из главных элементов томографа является набор из четырех мультиплексоров. От числа их каналов зависит максимальное количество подключаемых электродов и пространственное разрешение системы. В томографе используются готовые платы шестнадцатиканальных мультиплексоров, используемые в разработках на основе контроллеров Ардуино. На этих платах установлены интегральные мультиплексоры CD74HC4067.

В качестве управляющего микроконтроллера желательно использовать устройство с максимальным удобством программирования и доработки программного обеспечения и наличием беспроводного интерфейса для простого обеспечения электробезопасности. Был выбран модуль на высокопроизводительном 32-битном процессоре ESP32 PIKO-KIT. На модуле имеется встроенный USB порт, позволяющий программировать его и отлаживать программное обеспечение без дополнительных устройств. Встроенные WiFi и Bluetooth обеспечивают беспроводную связь.

Для тестирования системы используют фантомы. Обычно для ЭИТ это сосуд с подсоленной водой, в стенке которого смонтированы электроды. В качестве тестовых объектов в простейшем случае используются различные диэлектрические и металлические предметы, погружаемые в воду. В нашем случае фантом изготовлен из пластикового контейнера цилиндрической формы с винтами М4 из нержавеющей стали в качестве электродов. На рисунке 2 приведена фотография реализованной томографической системы с подключенным фантомом.

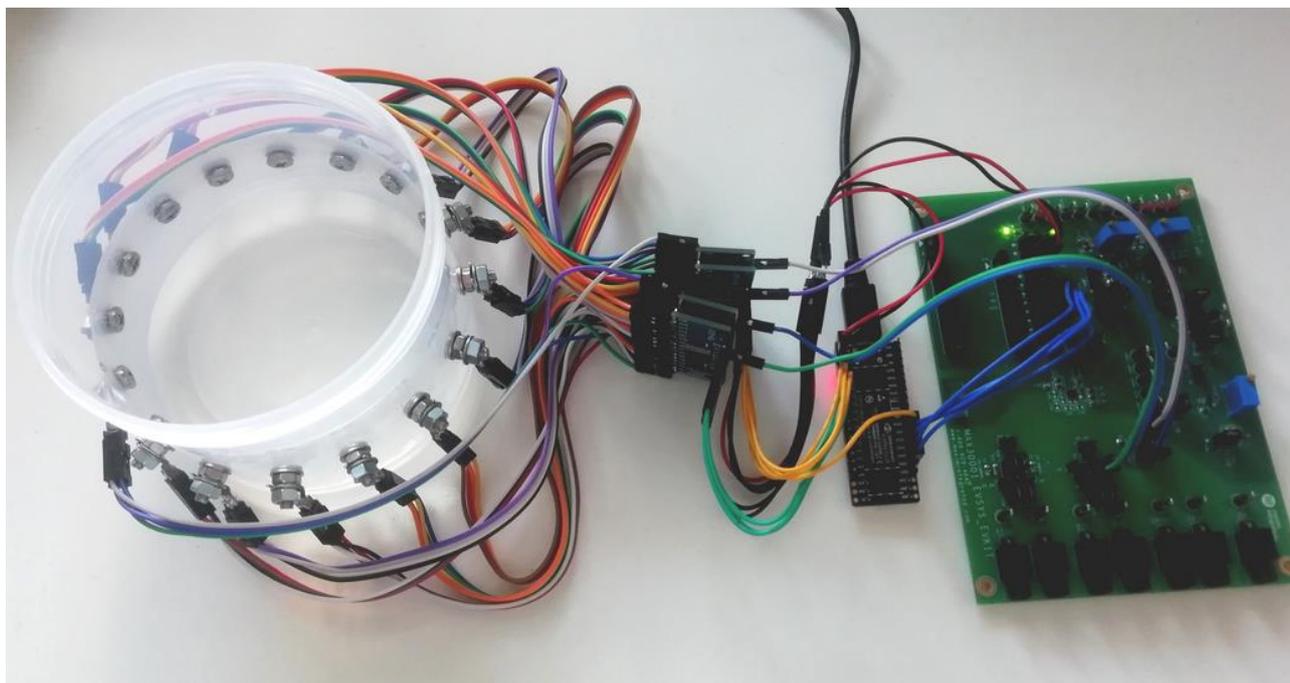


Рис. 2. Томограф с подключенным фантомом.

2. Встроенное программное обеспечение.

Для максимально быстрого прототипирования и отладки алгоритмов управления и обработки данных была использована среда программирования Ардуино для ESP32. Она обеспечивает легкий старт для работы с этим контроллером, включая его многочисленную периферию. Прошивка и взаимодействие с кодом в процессе отладки и тестирования томографа здесь также не вызовет затруднений даже у неспециалистов. В процессе разработки были оптимизированы процедуры обмена данными с MAX30001 а также циклограммы измерений и переключений мультиплексоров с учетом быстродействия и латентности АЦП а также необходимого уровня фильтрации сигнала. Невысокие показатели быстродействия встроенного в MAX30001 измерителя разности потенциалов обуславливают довольно значительное время для получения одного томографического изображения – более 20 с. Оптимизация стратегии сбора данных, в частности, использование взаимности измерений, позволит в дальнейшем ускорить этот процесс.

Начальная версия программы обеспечивает только самые базовые возможности, и, несомненно, будет существенно дополняться в процессе

дальнейшей работы и станет доступной в виде исходного кода на платформе github.com.

3. Алгоритм реконструкции изображений и его реализация.

Развитие методов решения обратной задачи электроимпедансной томографии является важным направлением научных исследований на протяжении многих лет. Чаще всего используются методы линейной и нелинейной оптимизации с регуляризацией по Тихонову или с более сложными методами регуляризации, поскольку задача с математической точки зрения является некорректной. Известно использование нейросетевых алгоритмов. Существует свободно распространяемая библиотека алгоритмов ЭИТ в составе пакета EIDORS [8] для среды Matlab/GNU Octave. Мы отдаем предпочтение линейному эвристическому методу, основанному на обратном проецировании результатов измерений вдоль эквипотенциальных линий электрического поля, поскольку он является одним из наиболее быстрых и нетребовательных к качеству входных данных. Особенно сложной задачей до настоящего времени остается так называемая статическая визуализация, при которой, в отличие от общераспространенной т.н. динамической визуализации, возможно получение изображения статических анатомических структур, таких как кости, различные органы, а также опухоли. Динамическая же визуализация, требующая проведения двух измерений на объекте с изменением его состояния, дает только изображение этих изменений, например изменение объема воздуха в легких, оставляя остальное невидимым. Нами разработан метод статической визуализации, основанный на обратных проекциях [2-4], который, несмотря на имеющиеся недостатки, такие как появление артефактов в виде инвертированных «двойников» высококонтрастных одиночных объектов, до настоящего времени является практически единственным применимым в клинической практике [9, 10].

Для ускорения процесса исследования пользователь может загружать данные, полученные с помощью описываемого в статье томографа, на

общедоступный сайт www.cplire.ru/tserver/ и выполнять там реконструкцию изображений, в том числе статическую. При этом программное обеспечение томографа обеспечивает выходную информацию сразу в требуемом для загрузки на сайт формате.

В дальнейшем доступ к исходному коду решателя обратной задачи с возможностью самостоятельного усовершенствования и компиляции для любой операционной системы (стандартный язык C) будет обеспечен через github.com.

4. Результаты.

Тестирование и оптимизация встроенного ПО томографа проведено на описанном в разделе 1 фантоме. На рис. 3 приведена фотография тестового объекта, а на рис. 4 – результаты его статической и динамической визуализации. В случае динамической визуализации в качестве опорного набора данных использовались результаты измерений на емкости с водой без погружения в нее объекта. Качество изображений оказалось весьма высоким по меркам электроимпедансной томографии.

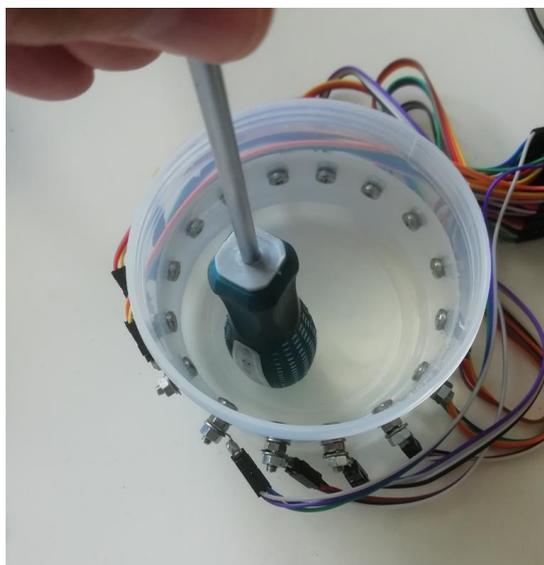


Рис. 3. Фантом с тестовым диэлектрическим объектом.

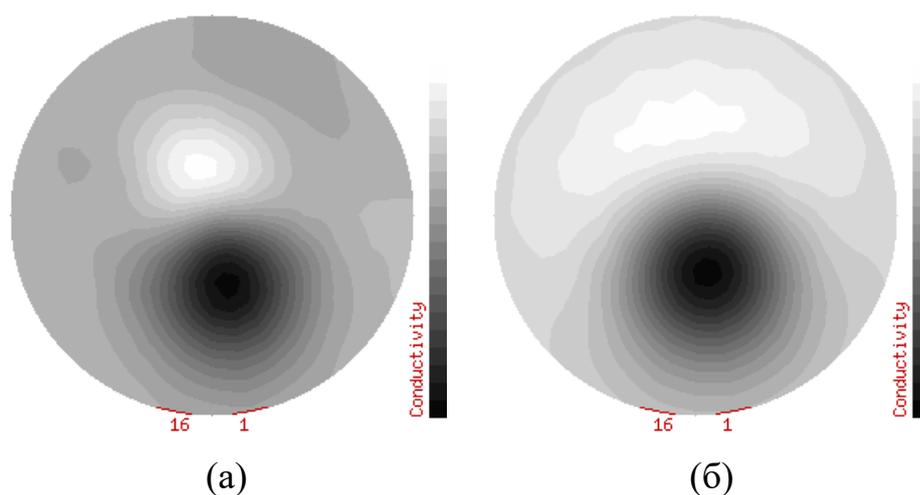


Рис. 4. Статическая (а) и динамическая (б) ЭИТ визуализация тестового объекта рис. 3.

Для проведения измерений на теле человека использовались одноразовые ЭКГ электроды. 16 электродов размещались вокруг грудной клетки по возможности равномерно, см. рис. 5. Результат статической реконструкции с указанием основных анатомических структур показан на рис. 6(а). На рис. 6(б) показан результат динамической визуализации, при которой использовались два набора данных, полученных на вдохе и на выдохе. Здесь, как и в большинстве известных ЭИТ системах визуализируется, фактически, только дополнительный объем воздуха в легких. При увеличении быстродействия системы становится также возможной динамическая визуализация процессов кровообращения – перфузии легких и сердечных сокращений.



Рис. 5. Электроды томографа, размещенные на грудной клетке.

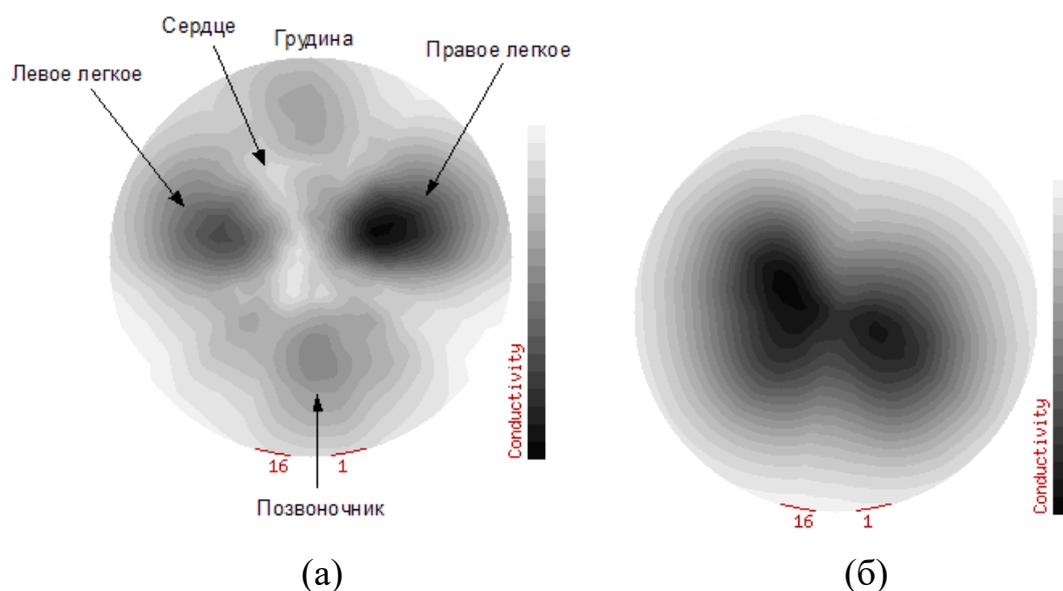


Рис. 6. Результат статической визуализации грудной клетки с указанием основных анатомических структур (а) и динамической визуализации с использованием измерений на вдохе в качестве основных данных и на выдохе – в качестве опорных.

Заключение.

Проблема взаимной недоступности квалифицированных медиков–энтузиастов и экспериментальной медицинской аппаратуры, разрабатываемой физиками и инженерами, в некоторых случаях может быть решена разработкой прототипов медицинских приборов, доступных для воспроизведения самими медиками или их ближайшим окружением с минимальными инженерно-техническими навыками. Примером такого решения является описанный в настоящей работе электроимпедансный томограф, потенциально применимый для диагностики легких при новой коронавирусной инфекции. Прибор демонстрирует высокое качество визуализации, как на фантоме, так и на теле человека. Его основным недостатком является низкое быстродействие, которое в некоторой мере может быть улучшено в процессе доработок. Программное обеспечение планируется развивать, в том числе, для обеспечения непосредственного доступа прибора к онлайн серверу реконструкции изображений, а в дальнейшем и к базе знаний, накапливаемой сообществом.

Финансирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-02088.

Литература

1. Barber D.C., Brown B.H., Freeston I.L. Imaging spatial distribution of resistivity using applied potential tomography. *Electronics Letters*. 1983. V.19. №22. P.933-935. <https://doi.org/10.1049/el:19830637>
2. Korjenevsky A.V. Reconstruction of absolute conductivity distribution in electrical impedance tomography. *Proc. 9th Int. Conf. On Electrical Bio-Impedance*. Heidelberg. 1995. P.532-535.
3. Корженевский А.В., Корниенко В.Н., Культиасов М.Ю., Культиасов Ю.С., Черепенин В.А. Электроимпедансный томограф для медицинских приложений. *Приборы и техника эксперимента*. 1997. №3. С.133-140.
4. Cherepenin V., Karpov A., Korjenevsky A., Kornienko V., Kultiasov Yu., Mazaletskaya A., Mazourov D. Preliminary static EIT images of the thorax in health and disease. *Physiol. Meas.* 2002. V.23. №1. P.33-41.
5. Маммограф «МЭМ» [электронный ресурс]. *Сайт «Импедансные медицинские технологии»*. <https://medimpedance.ru/products.html>
6. Swisstom BB² lung function monitor [online]. *Сайт компании Swisstom*. <http://www.swisstom.com/en/products>
7. Dräger PulmoVista® 500: Теперь вентиляцию можно увидеть [электронный ресурс]. *Сайт компании Dräger*. https://www.draeger.com/ru_ru/Hospital/Electrical-Impedance-Tomography
8. EIDORS: Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software [online]. <http://eidors3d.sourceforge.net/>
9. Шинкаренко В.С., Чучалин А.Г., Костромина Е.Ю. Применение электроимпедансной томографии для выявления скрытых форм патологии при массовых обследованиях населения. *Вестник РАМН*. 1997. №4. С.52-56.

10. Шинкаренко В.С., Чучалин А.Г., Костромина Е.Ю, Айсанов З.Р., Пашкова Т.Л., Волошина Н.А., Ягья Т.Н. Электроимпедансная томография в пульмонологии. *Терапевтический архив*. 1997. №4. С.48-51.

Для цитирования:

Корженевский А.В. Исследовательский электроимпедансный томограф, доступный для изготовления в нестандартных условиях. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.5>