

УДК 004.021:616-71

**АЛГОРИТМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ
В УСТРОЙСТВАХ ДВУМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ
ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ****Алексаян Г.К., Кучер А.И., Щербakov И.Д., Моряхин Е.А.***Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск, e-mail: graer@yandex.ru*

В работе рассмотрены проблемы, связанные с возникновением временных задержек между началом процесса исследования и вывода его обработанных результатов оператору в информационно-измерительных системах электроимпедансной томографии. Изучены причины появления таких задержек, в частности исследовано и показано влияние на них процесса передачи измерительных данных между блоком измерения и персональным компьютером, на котором происходит обработка, анализ, и реконструкция измерительных данных. В работе предложен ряд решений, которые позволяют повысить скорость передачи измерительных данных и, соответственно, уменьшить связанные с данным процессом временные задержки. В результате проведенных исследований разработаны два алгоритма передачи данных между измерительным устройством и персональным компьютером в составе информационно-измерительной системы электроимпедансной томографии. Проведено сравнительное исследование разработанных алгоритмов по ряду параметров, в результате выбран алгоритм, обеспечивающий наилучшую производительность и целостность передаваемых данных. Применение данного алгоритма позволит значительно повысить скорость передачи данных, повысить ее надежность, а также снизить нагрузку на микроконтроллер измерительного устройства. Полученные результаты позволяют реализовать методы трехмерной электроимпедансной томографии с минимизацией временных задержек, связанных с передачей измерительных данных.

Ключевые слова: электроимпедансная томография, передача данных**ALGORITHMS FOR THE TRANSMISSION OF MEASUREMENT DATA
IN THE DEVICES OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL
ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY****Aleksanyan G.K., Kucher A.I., Shcherbakov I.D., Moryakhin E.A.***South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, e-mail: graer@yandex.ru*

The paper discusses the problems associated with the occurrence of time delays between the start of the research process and the output of its processed results to the operator of electrical impedance tomography information-measuring systems. The reasons for the occurrence of such delays have been studied, in particular, the influence on them of the process of transferring measurement data between the measurement unit and the personal computer on which the measurement data is processed, analyzed, and reconstructed is investigated and shown. In this paper, a number of solutions are proposed that allow increasing the transfer rate of the measurement data and, accordingly, reducing the time delays associated with this process. As a result of the research, two data transfer algorithms between the measuring device and personal computer were developed as part of the electrical impedance tomography information-measuring system. A comparative study of the developed algorithms for a number of parameters was carried out; as a result, an algorithm was selected that ensures the best performance and integrity of the transmitted data. The use of this algorithm will significantly increase the speed of data transmission, increase its reliability, as well as reduce the load on the microcontroller of the measuring device. The results obtained will allow to implement the methods of three-dimensional electrical impedance tomography with minimization of time delays associated with the transfer of measurement data.

Keywords: electrical impedance tomography, data transfer

Аппаратно-программная реализация метода электроимпедансной томографии [1] (ЭИТ) неизбежно связана с использованием нескольких совместно функционирующих вычислительных блоков, а именно: блок источника инжектируемого тока, блок измерения, блок микроконтроллерного управления аппаратной части и персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением [2, 3]. На рис. 1 приведена общая структурная схема информационно-измерительной системы (ИИС) для случая двухмерной и трехмерной ЭИТ, на которой выделены данные основные функциональные блоки.

На рис. 2 показаны разработанные авторами ранее технические средства, позволяющие выполнять исследования объектов методом ЭИТ [3]:

- установка для проведения измерений методом ЭИТ, состоящая из персонального компьютера с установленным программным обеспечением, блоком измерения и макетом, позволяющим имитировать неоднородность в проводящей среде (рис. 2, а);
- функциональный макет томографического среза грудной клетки человека (рис. 2, б);
- функциональный макет томографического среза грудной клетки малых биологических объектов.

ческих форм с поддержкой измерения методом трехмерной ЭИТ в двух поясах (рис. 2, в);

– макет томографического среза грудной клетки человека с поддержкой измерения методом трехмерной ЭИТ в десяти поясах (рис. 2, г);

– макет, позволяющий имитировать неоднородность в проводящей среде с поддержкой измерения методом трехмерной ЭИТ в двух поясах (рис. 2, д).

Функционирование ИИС в режимах реального и квазиреального времени, необходимых для визуализации методом ЭИТ динамических процессов, протекающих в объекте, предъявляет требования к частоте обновления реконструируемых

изображений не менее чем 20 кадров в секунду [4]. В этой связи критическими являются источники задержек, вносимые структурами аппаратной части ИИС. В работах [5] и [6] описаны способы технической реализации системы двумерной ЭИТ с применением одного пояса электродов. В данных работах проведена оценка временных задержек, связанных с ресурсоемкостью процесса обработки, анализа, реконструкции и вывода результатов измерения, полученных методом ЭИТ. В настоящей работе выполнена оценка временных задержек, связанных с передачей измерительных данных между блоком измерения и персональным компьютером.

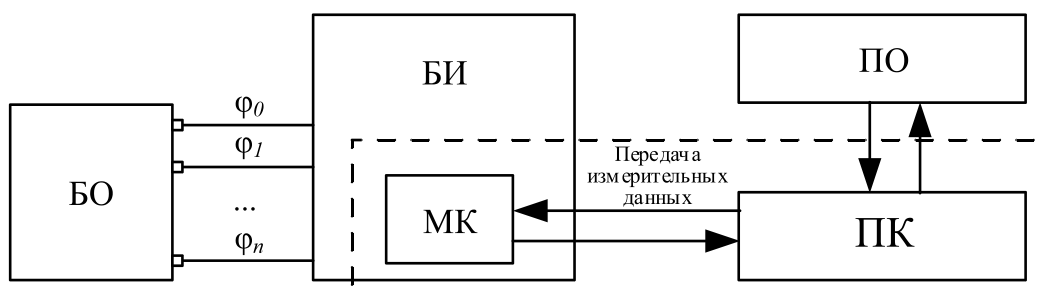
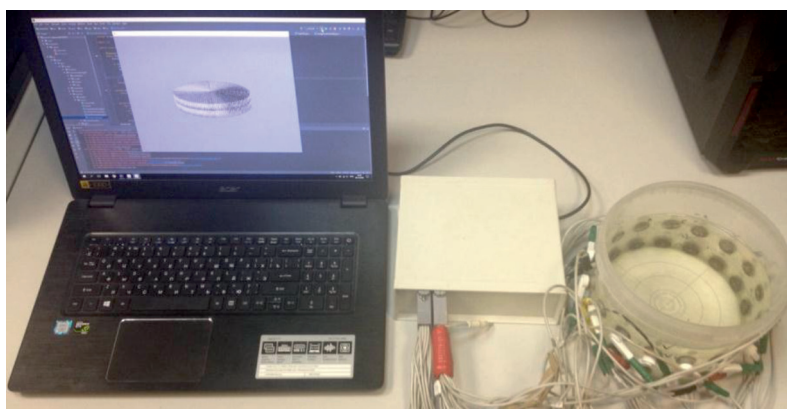
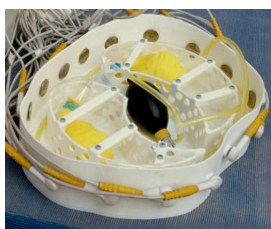


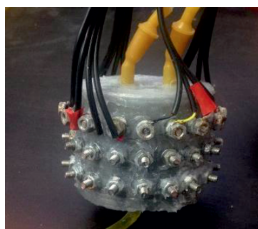
Рис. 1. Общая структурная схема информационно-измерительной системы (ИИС) для случая двумерной и трехмерной ЭИТ



а)



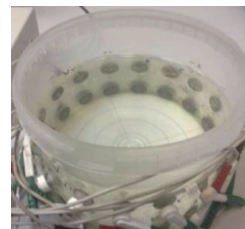
б)



в)



г)



д)

Рис. 2. а) Внешний вид разработанной ИИС; б)–д) разработанные макеты, «фантомы» и электродные системы

Материалы и методы исследования

При увеличении числа электродных поясов (при реализации трехмерной ЭИТ) неизбежно возрастают объемы передаваемой информации. На основании приведенных в работе [7] данных об объеме измерений $N_{\text{ф}}$ при варьировании числа электродных поясов $N_{\text{ЭБ}}$ была рассчитана ресурсозатратность в виде относительного времени задержки передачи данных $t_{\text{отн}}$, при допущении, что $t_{\text{отн}}$ изменяется пропорционально изменению $N_{\text{ф}}$. В табл. 1 представлена сравнительная оценка ресурсозатратности двумерной и трехмерной ЭИТ по выделенным параметрам, а именно: общее число электродов (N), количество электродов в поясе ($N_{\text{ЭЛ}}$), количество электродных поясов ($N_{\text{ЭБ}}$), количество регистрируемых потенциалов ($N_{\text{ф}}$), относительное время задержки передачи данных ($t_{\text{отн}}$).

Проведенные расчеты показали, что при $N_{\text{ЭБ}} = 2$ задержка $t_{\text{отн}}$ будет больше в 4,46 раз по сравнению с таковой при $N_{\text{ЭБ}} = 1$, а при $N_{\text{ЭБ}} = 10$, $t_{\text{отн}}$ будет больше уже в 120,8 раз.

В этой связи существует необходимость в разработке новых подходов, методов и алгоритмов, позволяющих уменьшить временные задержки, что позволит повысить быстродействие всей ИИС. В данной статье предлагается один из способов повышения быстродействия ИИС, основанный на разработке нового алгоритма вывода массива измерительной информации.

При проведении исследований использованы разработанные ранее авторами технические средства электроимпедансной томографии, в частности ИИС ЭИТ, «фантомы», электродные системы, показанные на рис. 2. Разработка предлагаемого алгоритма велась на языке программирования C [8]. Отладка выполнялась на блоке микроконтроллера аппаратной части, построенной на базе микроконтроллера архитектуры ARM Cortex-M4 [9].

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлены блок-схемы двух разработанных алгоритмов взаимодействия АПЧ_МК и ПК, в частности передача измерительной информации в ПК.

На рис. 3, а, показан разработанный ранее алгоритм построчного вывода измерительной информации, который рекомендовал себя как наиболее простой в реализации в составе программного обеспечения как микроконтроллера, так и персонального компьютера. Данный алгоритм осуществляет форматированный вывод информации таким образом, что данные каждого измерения передаются на персональный компьютер построчно, пока не будет завершен вывод данных всех измерений.

Для вывода каждого измерения используется функция *printf()* стандартной библиотеки языка программирования C [8]. Кроме того, для обмена данными между блоком измерения и персональным компьютером была задана скорость $V = 230400$ бит/с. По результатам выполненных исследований было установлено, что дальнейшее увеличение скорости приводит к ошибкам передачи данных, приводившим к потерям измерительной информации.

К достоинствам данного алгоритма можно отнести простоту реализации и возможность использования измерительных данных без дальнейшей математической обработки. Недостатками данного алгоритма являются:

- низкая скорость обмена данных между микроконтроллером и персональным компьютером;
- большое число операций, используемых при выводе измерительной информации, и, как следствие, повышенная нагрузка на микропроцессор микроконтроллера;
- возможность потери целостности передаваемых измерительных данных.

Блок-схема алгоритма вывода массива измерительной информации представлена на рис. 3, б.

Для увеличения скорости передачи данных с МК_АПЧ на персональный компьютер был изменён способ передачи значений измеренных потенциалов φ_r . Массив измерительной информации был отформатирован в виде числа с плавающей точкой с шестью знаками после неё. Так как примененные в первоначальной версии алгоритма передачи измерительных данных форматирование вывода и многочисленные вызовы функции *printf()* служили источниками существенных задержек, данная функция вывода была заменена на функцию *write()* [10]. Данная функция является функцией более низкого уровня, но при этом потребляет меньше процессорного времени [8]. Функция выводит блок памяти, занимаемый измерительными данными, целиком. Так как *write()* является функцией байтового вывода, при передаче измерительных данных необходим перевод из формата числа с плавающей точкой в байты. При приеме измерительных данных программным обеспечением на персональном компьютере осуществляется обратный процесс.

Таблица 1

Сравнительная оценка ресурсозатратности двумерной и трехмерной ЭИТ

Вид исследования	$N_{\text{ЭБ}}$, шт	$N_{\text{ЭЛ}}$, шт	N , шт	$N_{\text{ф}}$, В	$t_{\text{отн}}$
Двумерная ЭИТ	1	16	16	208	1
Трехмерная ЭИТ	2	16	32	928	4,46
Трехмерная ЭИТ	10	16	160	25120	120,8

Применение реализованного алгоритма передачи измерительных данных, снижающего нагрузку на микроконтроллер, также позволило повысить скорость обмена данными между измерительным устройством и персональным компьютером до максимальной для выбранного микроконтроллера $V = 921600$ бит/с [12].

Таким образом, к достоинствам второго алгоритма можно отнести:

- высокую скорость обмена данных между микроконтроллером и персональным компьютером;
- всего одну операцию, используемую при выводе всего массива измерительной информации;
- снижение нагрузки на микропроцессор микроконтроллера вследствие снижения потребления процессорного времени;
- повышенную надежность передаваемых измерительных данных.

Недостатками данного алгоритма являются сложность реализации и невозможность использования измерительных данных без разработанного под эти нужды программного обеспечения.

Для сравнения результатов работы разработанных алгоритмов на аппаратно-программном комплексе ЭИТ [5, 6] было проведено исследование зависимости времени задержки, источником которой является передача измерительных данных t , от применяемого алгоритма передачи измерительных данных и скорости обмена данными.

Использована ИИС [6], фантом с подключенным электродным поясом, выбрана следующая конфигурация: $N_{EB} = 1$, $N_{EL} = 1$. На основании предварительно проведенных исследований разработанных алгоритмов были выбраны значения $V = 230400$, 460800 и 921600 бит/с.

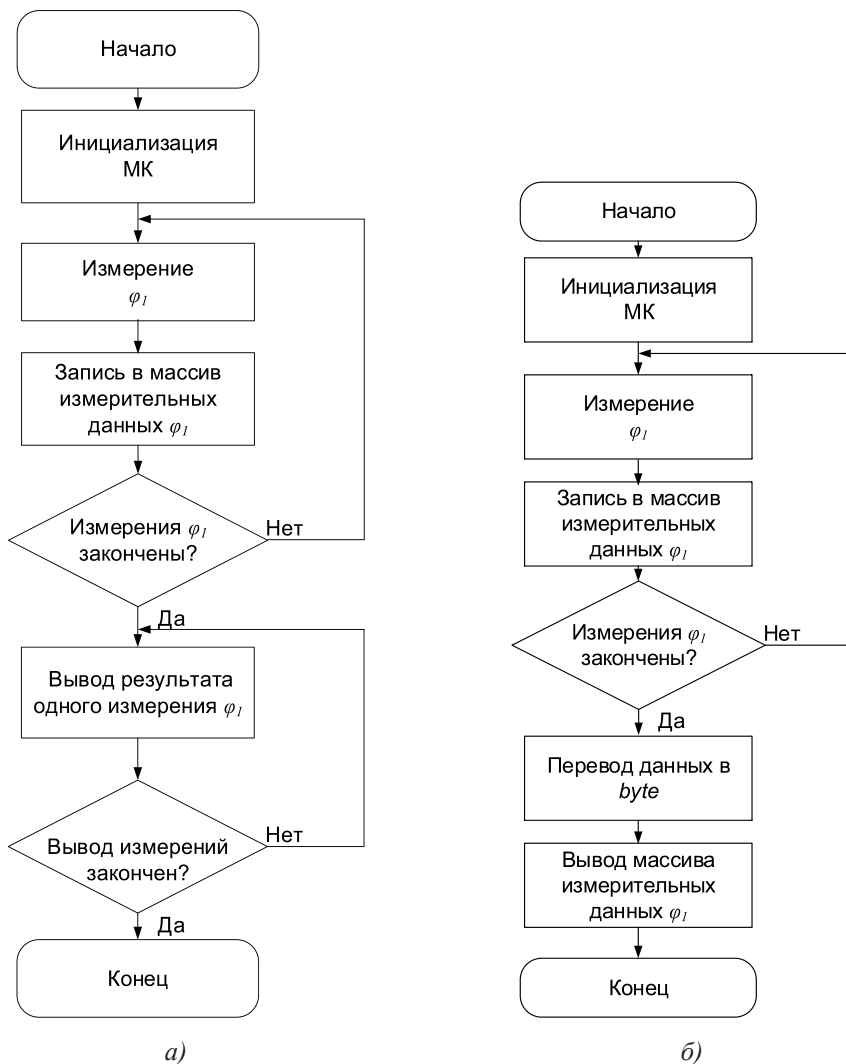


Рис. 3. а) алгоритм построочного вывода измерительной информации;
б) алгоритм вывода массива измерительной информации

Таблица 2

Сравнение t при различных параметрах передачи данных

V , бит/с	Алгоритм	t , мс	Возникновение ошибок при передаче данных
230400	Построчный вывод	140	нет
230400	Вывод массива	75	нет
460800	Построчный вывод	75	да
460800	Вывод массива	40	нет
921600	Построчный вывод	45	да
921600	Вывод массива	30	нет

Результаты исследования приведены в табл. 2.

Анализ результатов проведенного исследования показывает практически двукратное уменьшение t при применении усовершенствованного алгоритма с той же V . Кроме того, благодаря уменьшению нагрузки на микроконтроллер измерительного устройства повышение v до 921600 бит/с не привело к появлению ошибок при передаче измерительных данных. Таким образом, применение усовершенствованного алгоритма передачи измерительных данных с учетом повышения V позволило уменьшить t почти в 5 раз, со 140 мс до 30 мс, что позволяет увеличить скорость обновления с 7 кадров/с до 33 кадров/с соответственно.

Заключение

В работе показано существенное влияние временных задержек, вызванных недостаточной скоростью передачи данных, на процесс визуализации методом электроимпедансной томографии, особенно при реализации многопоясной схемы измерения.

В результате проведенных исследований разработаны два алгоритма передачи данных между измерительным устройством и персональным компьютером в составе аппаратно-программного комплекса электроимпедансной томографии. Проведено сравнение разработанных алгоритмов по нескольким параметрам, в результате которого выбран алгоритм, обеспечивающий наилучшую производительность. Применение данного алгоритма позволило значительно повысить скорость передачи данных, повысить ее надежность и снизить нагрузку на микроконтроллер измерительного устройства.

Полученные результаты позволяют реализовать методы трехмерной электроимпедансной томографии с минимизацией временных задержек, связанных с передачей измерительных данных.

Работы выполняются в рамках гранта Президента Российской Федерации для

государственной поддержки молодых российских ученых МК-196.2017.8.

Список литературы

1. Пеккер Я.С., Бразовский К.С. Электроимпедансная томография. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 192 с.
2. Алексанян Г.К., Денисов П.А., Кучер А.И. Исследование применимости натурно-модельного подхода для задач реконструкции поля проводимости при многочастотной электроимпедансной томографии // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11–5. С. 895–899.
3. Алексанян Г.К., Кучер А.И., Демьянов В.В. Разработка печатной платы коммутаторов и источника тока для информационно-измерительной системы электроимпедансной томографии биологических объектов // *Теория и практика современной науки*. 2016. № 11 (17). С. 24–29.
4. Teschner E., Imhoff M., Leonhardt S. Electrical Impedance Tomography: The realisation of regional ventilation monitoring/ 2nd edition. Draeger Medical GmbH [Электронный ресурс]. URL: https://www.draeger.com/library/content/rsp_eit_booklet_9066788_en_2.pdf (дата обращения: 29.09.2018).
5. Сулыз А.В., Кучер А.И., Поликарпов А.В., Бадашев В.В. Применение форматов обмена данных для хранения математических моделей объектов исследований в задачах электроимпедансной томографии // *Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: 19-я Междунар. молодежная науч.-практ. конф.*, (г. Новочеркасск, 27–28 февраля 2018 г.). Новочеркасск, 2018. С. 275–277.
6. Алексанян Г.К., Щербаков И.Д., Кучер А.И., Рябченко В.Ю. Разработка программного обеспечения для хранения и обработки данных в задачах электроимпедансной томографии // *Современные проблемы физико-математических наук: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием* (г. Орёл, 22–25 ноября 2018 г.). Орёл, 2018. С. 312–315.
7. Andy Adler, William R.B. Lionheart. Uses and abuses of EIDORS: An extensible software base for EIT // *Physiological measurement*. 2006. Vol. 27. P. 25–42.
8. Керниган Б., Ритчи Д. Язык программирования С. М.: Вильямс, 2015. 304 с.
9. Trevor Martin. Designer's Guide to the Cortex-M Processor Family, 2nd Edition. Newnes, 2016. 490 p.
10. Function printf [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cplusplus.com/reference/cstdio/printf/> (дата обращения: 01.11.2018).
11. Function write [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cplusplus.com/reference/cstdio/write/> (дата обращения: 01.11.2018).
12. Скорость передачи данных через UART // Дмитрий Бравиков [Электронный ресурс]. URL: <https://bravikov.wordpress.com/2012/08/24/скорость-передачи-данных-через-uart/> (дата обращения: 01.11.2018).