

На правах рукописи



Соловьев Михаил Николаевич

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БИОИМПЕДАНС-
НОГО АНАЛИЗА СОСТАВА ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА**

Специальность:

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель: Юлдашев Зафар Мухамедович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», заведующий кафедрой биотехнических систем.

Официальные оппоненты:

– **Филатова Наталья Николаевна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет» Министерства науки и образования Российской Федерации, профессор кафедры автоматизации технологических процессов (г. Тверь).

– **Кирик Дмитрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича», заведующий кафедрой «Конструирования и производства радиоэлектронных средств» (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национально-исследовательский университет «МИЭТ» (г. Москва).

Защита состоится 26 марта 2019 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.238.10 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан “24” января 2019 года.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций



Садыкова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Изучение водного баланса и состава тела человека широко используется в спортивной медицине и индустрии велнесс; для оценки эффективности восстановления центрального и периферического кровообращения; при лечении нарушений деятельности печени и почек, ряда сопутствующих проявлений (отек нижних конечностей, легких, асцит, переломы); в диетологии для формирования и контроля эффективности медицинских диет.

В этой связи проблема повышения точности оценки объемов внутри и внеклеточной жидкости тела является актуальной, так как ее решение позволит точнее оценивать эффективность лечебного процесса.

Среди существующих неинвазивных методов оценки состава тела человека метод биоимпедансного анализа (БИА) состава тела человека выделяется своей простотой проведения измерений, относительно низкой стоимостью оборудования при достаточно высокой точности оценки показателей состава тела человека; БИА обладает *наибольшим* количеством измеряемых показателей, включая как жидкостные параметры, так и параметры состава тела человека.

Однако, биоимпедансные методы также не лишены недостатков. В клинической практике существует потребность в оценке состава конечностей, туловища и их подсегментов у пациентов с ярко выраженными отклонениями в строении конечностей при серьезных отеках, избыточной мышечной или жировой массе. Эти методы не позволяют проводить оценку состава тела человека с необходимой точностью у таких групп обследуемых ввиду несовершенства используемой модели тела человека и статистической базы метода – они не учитывают индивидуальные особенности строения тела человека. При обследовании определенных групп пациентов, современные методы БИА характеризуются низкой точностью в определении баланса больших объемов мышечной и жировой масс.

В качестве решения данной проблемы предлагается разработка методического и аппаратно-программного обеспечения для оценки состава тела человека, которое поможет существенным образом повысить точность оценки состава тела человека у этих групп обследуемых.

Цель исследования: разработка метода и инструментальных средств, обеспечивающих повышение точности оценки и анализа состава тела человека с помощью метода биоимпедансометрии.

Объектом исследования является аппаратно-программный комплекс для биоимпедансного анализа состава тела человека.

Предметом исследования являются компоненты информационного,

методического, инструментального и программно-алгоритмического обеспечения аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека.

Задачи исследования

1. Развитие и усовершенствование моделей, описывающих состав тела человека при проведении многочастотной биоимпедансометрии и учитывающих индивидуальные особенности строения тела человека.
2. Разработка метода оценки состава тела человека с помощью многочастотной биоимпедансометрии на основе анализа предложенной модели.
3. Разработка структуры аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека в соответствии с предложенным методом.
4. Разработка алгоритмов обработки и анализа результатов исследования состава тела человека, формирования диагностического заключения.
5. Разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека и проведение лабораторных исследований.
6. Проведение метрологических исследований аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека, основанного на предложенном методе.

Научная новизна результатов исследования

1. Предложен и обоснован метод трехчастотной биоимпедансометрии, отличающийся использованием дополнительной, третьей частоты зондирующего тока и обеспечивающий повышение точности измерения объема внутриклеточной жидкости.
2. Разработана усовершенствованная сегментарная пятизвенная модель состава тела человека с использованием трехчастотной биоимпедансометрии, обеспечивающая повышение точности оценки состава тела человека за счет учета структурных особенностей тела.
3. Разработана структура аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего повышение точности оценки состава тела человека с помощью метода трехчастотной полисегментарной биоимпедансометрии.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии метода и аппаратно-программного комплекса биоимпедансного анализа состава тела человека, расширении границ его применения в новых диагностических областях и группах обследуемых.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека с помощью трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии и внедрении его в серийное производство в ООО «Диамант» и клиническую практику.

Методы исследования

В работе использованы методы системного анализа, методы

математического и схемотехнического моделирования, статистические методы, методы анализа и синтеза электронных устройств, методы объектно-ориентированного программирования.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Для повышения точности косвенной оценки состава тела человека на основе биоимпедансометрии необходимо использовать зондирующие токи с частотами 28,0 кГц и 115,0 кГц, традиционно принятыми для исследований, дополнительно использовать зондирующие токи с частотой 460 кГц для точной оценки сопротивления внутриклеточной жидкости.
2. Для повышения точности косвенной оценки состава тела человека за счет учета индивидуальных структурных особенностей строения тела человека необходимо использовать методику исследования, основанную на сегментарной пятизвенной модели состава тела человека, учитывающей различия структуры тканей нижних и верхних конечностей, сегментов грудной клетки.
3. Для уточнения результатов оценки состава тела человека на основе биоимпедансометрии аппаратно-программный комплекс должен обеспечивать использование оценку сопротивлений внутри и внеклеточной жидкости на трех частотах зондирующего тока и различных сегментах тела человека.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях: XV международная НТК по мягким вычислениям и измерениям (SCM`2012); научная конференция «Биомедсистемы – 2014», г. Рязань; юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, г. Санкт-Петербург, 2015; конференция “Кардиостим-2016”, г. Санкт-Петербург; 3-я международная НТК «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах», г. Тамбов, 2016; 4-я международная НТК «Энергосбережение и эффективность в технических системах», г. Тамбов, 2017; конференция “Биомедсистемы-2017”, г. Рязань.

Внедрение результатов работы

Теоретические и практические результаты работы внедрены в производственный цикл ООО «Диамант», разработанный аппаратно-программный комплекс используется в научно-исследовательской деятельности на базе предприятия ООО «Диамант».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работах. Из них 3 статьи – опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 11 работ – в материалах международных и российских научно-технических конференций; получено свидетельство Роспатента на программу для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные научные и практические результаты, положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание глав научно-квалификационной работы.

Первая глава посвящена анализу проблем современных методов оценки состава тела человека, включая метод двухчастотного биоимпедансного анализа как наиболее распространенный и применимый в клинической практике неинвазивный метод. Рассмотрены проблемы его методического, технологического, инструментального, алгоритмического и программного обеспечения.

Рассмотрены основные причины, обуславливающие актуальность проблемы развития биоимпедансного метода оценки состава тела человека. Проведен сравнительный анализ современных методик оценки состава тела человека, определены их преимущества и недостатки, рассмотрены случаи возникновения методической ошибки измерений для отдельных групп пациентов. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** предложены новая усовершенствованная модель тела человека и метод сегментарной трехчастотной биоимпедансометрии.

При проведении двухчастотной биоимпедансометрии используются следующие допущения:

1. На низкой частоте (до 30 кГц) емкостное сопротивление клеточной мембраны X_c (рисунок 1) слишком велико и вклад внутриклеточной жидкости в общее сопротивление пренебрежимо мал, поэтому сопротивление ткани будет определяться в основном R_v ;

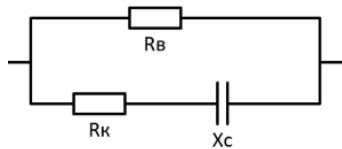


Рисунок 1

2. На высокой частоте (более 100 кГц) емкостное сопротивление клеточной мембраны X_c пренебрежимо мало, зондирующий ток протекает параллельно по внеклеточной и внутриклеточной жидкостям (сопротивления R_v и R_k).

Анализ этих допущений и результаты экспериментальных исследований показали, что они вносят серьезную погрешность при измерении сопротивления внутриклеточной жидкости R_k , так как в случаях обследования отдельных групп пациентов эквивалентное сопротивление клеточной мембраны X_c существенно больше ожидаемого значения R_v с разницей до целого порядка.

На примере измерения импедансометрических параметров и параметров состава тела у пациента (Таблица 1), отобранного из группы обследуемых с повышенной мышечной массой, показано возникновение методической ошибки измерения жировой и мышечной массы. Результаты измерений методом БИА

сравниваются с показателями системы должных показателей нормы по индексу массы тела (ИМТ) и контрольным методом двухмерной денситометрии. В данном примере метод БИА показывает высокую погрешность оценки показателей жировой и мышечной масс.

Таблица 1

Параметр	Должное значение	БИА	Денситометрия
R_b	189 Ом	189 Ом	-
R_k	$\approx 94,5$ Ом	≈ 830 Ом	-
C_m	3,5 нФ	-	-
Жировая масса (ЖМ)	14 кг	25,3 кг	17,7 кг
%ЖМ	18%	26%	19%
Мышечная масса (ММ)	30 кг	46 кг	75 кг
%ММ	39%	48%	77%

Показано, что емкостное сопротивление X_c принимает конечное значение на обеих используемых частотах зондирующего тока и оказывает существенное влияние на оценку сопротивления внутриклеточной жидкостей, в данном случае рассчитанное с учетом рассматриваемых допущений значение показателя R_k в 8.8 раз превышает ожидаемое значение, что существенным образом сказывается на рассчитываемых значениях показателей жировой и мышечной массы:

$$\begin{aligned} R_k &= f(Z_1, Z_2), \\ V_k &= f(R_k, L, k_{ст}, V_{кд}), \\ m_{ММ}, m_{ЖМ} &= f(V_k, m, k_{ст}, m_{ММд}), \end{aligned}$$

где Z_1, Z_2 – значения импедансов тела человека на 2 частотах, L – рост человека, $k_{ст}$ – статистические коэффициенты, V_k – объем внутриклеточной жидкости, $V_{кд}$ – значение нормы системы должных показателей для внутриклеточной жидкости, $m_{ММ}, m_{ЖМ}$ – мышечная и жировая массы соответственно, m – вес человека, $m_{ММд}$ – значение нормы системы должных показателей для мышечной массы.

Для более точной оценки величины сопротивления внутриклеточной жидкости предлагается измерение импеданса тела на третьей частоте зондирующего тока:

$$\left\{ \begin{aligned} Z_1 &= \frac{R_b \sqrt{R_k^2 + x_c^2}}{\sqrt{(R_b + R_k)^2 + x_c^2}} \\ Z_2 &= \frac{R_b \sqrt{R_k^2 + x_{c2}^2}}{\sqrt{(R_b + R_k)^2 + x_{c2}^2}} = \frac{R_b \sqrt{R_k^2 + (\frac{1}{k_2} x_c)^2}}{\sqrt{(R_b + R_k)^2 + (\frac{1}{k_2} x_c)^2}} \\ Z_3 &= \frac{R_b \sqrt{R_k^2 + x_{c3}^2}}{\sqrt{(R_b + R_k)^2 + x_{c3}^2}} = \frac{R_b \sqrt{R_k^2 + (\frac{1}{k_3} x_c)^2}}{\sqrt{(R_b + R_k)^2 + (\frac{1}{k_3} x_c)^2}} \end{aligned} \right. (1),$$

где Z_1, Z_2 – измеренные импедансы на двух частотах по методике ИДИ. Z_3 – измеренный импеданс на третьей частоте.

В системе (1) имеется три неизвестных: X_c, R_k и R_b , каждая из которых имеет свое диагностическое значение и для вычисления которых необходимо решить представленную систему из трех уравнений.

Решение данной системы уравнений лежит в основе предлагаемого метода трехчастотной биоимпедансометрии. Помимо используемых в двухчастотном методе параметров R_k и R_b , в трехчастотный метод вводится параметр эквивалентной емкости клеточной мембраны C_m , который характеризует исследуемых тканей на клеточном уровне. Тогда формулы расчета основных показателей состава тела человека в общем виде будут включать следующие переменные:

$$R_b, R_k, C_m = f(Z_1, Z_2, Z_3);$$

$$V_b, V_k = f(R_b, R_k, L, k_{ст});$$

$$m_{акм}, m_{мм}, m_{бжм}, m_{жм} = f(V_k, C_m, L, l_3, m, k_{ст});$$

где C_m – эквивалентная емкость клеточной мембраны; V_b, V – объемы внеклеточной и внутриклеточной жидкости; L – рост, m – вес; l_3 – окружность запястья; $m_{акм}, m_{мм}, m_{бжм}, m_{жм}$ – активная клеточная, мышечная, безжировая и жировая массы соответственно; $k_{ст}$ – статистические коэффициенты.

Первые две частоты выбраны по следующим критериям: частота 28 кГц – близкая к оптимальной частота регистрации пульсовой волны в тканях сегментов туловища; частота 115 кГц – близкая к оптимальной частота регистрации реограммы мозга. Выбор третьей частоты зондирующего тока в общем случае может быть *любым*, но на практике она может быть выбрана, исходя из задачи достижения оптимизации погрешностей измерений согласно следующему сформированному критерию: *погрешность вычисления R_k должна быть меньше методической погрешности измерения объема жидкости биоимпедансными методами*.

В целях выбора третьей частоты зондирующего тока было проведено моделирование амплитудно-частотной характеристики исследуемой схемы (рисунок 1а) в программе MicroCap со следующими исходными данными: $R_b = 200$ Ом, $R_k = 50...300$ Ом с шагом 50 Ом, $C_1 = 1...7$ нФ (ожидаемый диапазон изменения эквивалентной емкости клеточной мембраны у реальных пациентов) с шагом 1 нФ. Результаты приведены на рисунке 2.

По результатам моделирования и экспериментальных измерений частота 460 кГц была принята в качестве третьей частоты для использования в разрабатываемом аппаратно-программном комплексе.

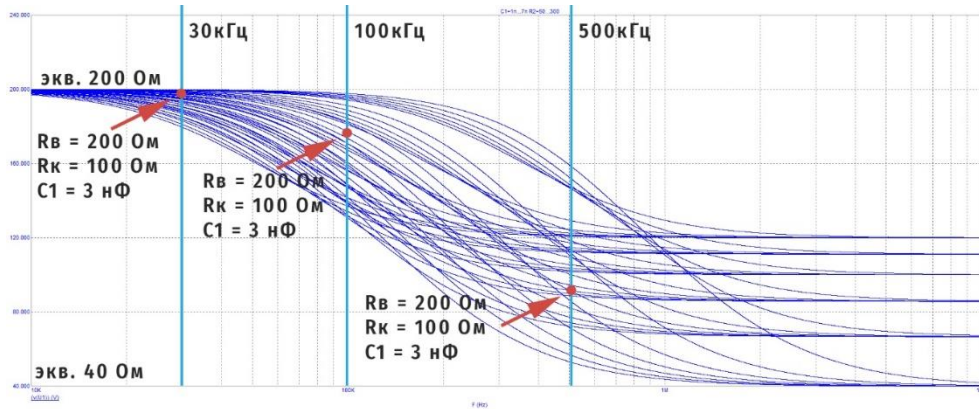


Рисунок 2

Для повышения точности оценки сопротивления внутриклеточной жидкости и косвенной оценки состава тела человека у разных групп обследуемых необходимо учитывать также индивидуальные особенности строения тела человека. На рисунке 3 приведена электрическая схема строения тела человека для предлагаемого сегментарного трехчастотного метода.

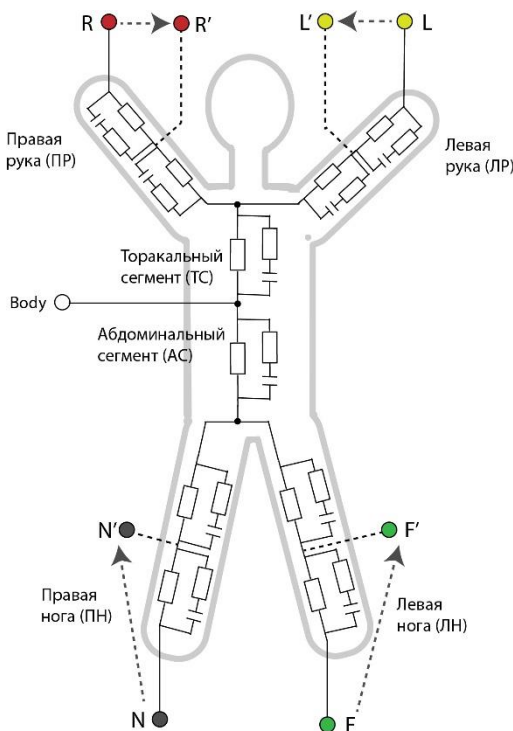


Рисунок 3

В общем случае модель имеет пятизвенную структуру, однако, она может быть преобразована в шестизвенную при измерении импедансов абдоминального и торакального сегментов с использованием дополнительного электрода (Body) на туловище обследуемого. Или в девяти- или десятизвенную при разбиении сегментов конечностей на подсегменты путем сдвига электродов по конечности и повторного измерения импедансов.

Особенности предлагаемой модели:

1. Непосредственное измерение сопротивления внеклеточной жидкости, внутриклеточной жидкости и эквивалентной емкости клеточной мембраны с использованием трех частот зондирующего тока.
2. Модель тела человека разбита на сегменты. Учет особенностей строения каждого из сегментов.
3. Отсутствие аддитивной статистической компоненты системы должных показателей нормы при расчете жидкостных секторов организма.
4. Универсальность модели.
 - а. Модель пригодна для исследования разнообразных групп обследуемых, в том числе людей с нетипичным строением тела.

- б. Возможность исследовать абдоминальный и торакальный сегменты по отдельности, выделять подсегменты конечностей, проводить обследования пациентов с частично или полностью утерянными конечностями.
- в. Возможность диагностики заболеваний с сопутствующими симптомами одной конечности с использованием референтной конечности.

5. Модель пригодна для использования со стандартной тетраполярной системой отведений.

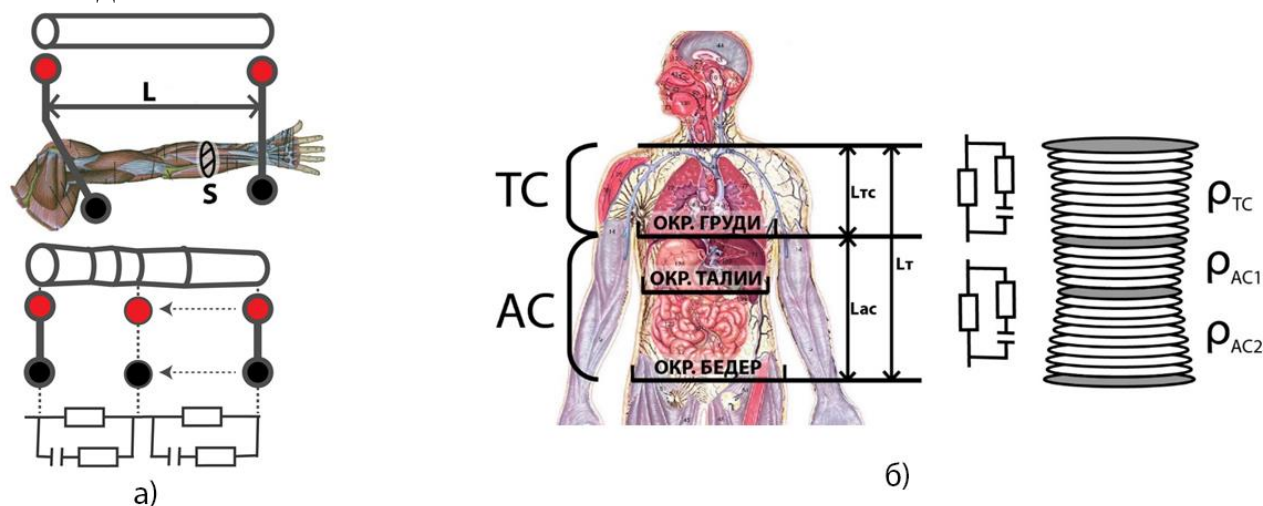


Рисунок 4.

На рисунке 4 изображены способы деления конечностных сегментов (рисунок 4а) и сегмента туловища (рисунок 4б) на подсегменты согласно их физиологическому строению и удельной проводимости. Для учета индивидуальных особенностей строения тела человека разработан следующий алгоритм восстановления объемно-массовых показателей состава тела человека:

1. Расчет недостающих дополнительных антропометрических исходных параметров модели.
2. Расчет формы продольного среза сегмента методом математической интерполяции.
3. Оценка площади поперечного сечения сегмента на каждом шаге интерполяции.
4. Выделение значимых для физической модели подсегментов с их физиологической привязкой к результатам интерполяции.
5. Оценка объема сегмента и его значимых подсегментов.
6. Оценка массы сегмента и его значимых подсегментов.



Рисунок 5

В ходе анализа предлагаемой сегментарной модели оценки состава тела человека были выделены следующие группы антропометрических параметров тела человека, используемых как исходные параметры модели:

1. *Основные* антропометрические параметры: рост, окружности запястья, груди, талии, бедер и бедра.
2. *Дополнительные* антропометрические параметры.

Первая группа параметров носит *обязательный* характер для расчетов по сегментарной методике. Вторая группа исходных параметров используется только при обследовании *определенных групп обследуемых*.

Кроме того, вводится еще одна группа *дополнительных качественных* параметров, таких как тип телосложения, наличие дефектов конечностей, признак использования отдельной конечности в качестве референтной.

Алгоритм проведения обследования по методике анализа состава тела человека с помощью трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии приведен на рисунке 5.

Было предложено внедрение предварительного этапа проведения обследования, содержащего следующие шаги:

1. Измерение импедансометрических данных.
2. Заполнение необходимых антропометрических данных.
3. Предварительная оценка основных показателей состава тела человека и его сегментов.
4. Оценка состава тела по методике ИДИ.
5. Формирование портрета пациента и его классификация.
6. Формирование решения о необходимости использования дополнительных исходных параметров.

Шаги 1, 3, 4, 5, 6 производятся в автоматическом режиме, а этап 2 выполняется вручную врачом при использовании любого метода биоимпедансного анализа состава тела.

Выбор рекомендуемого набора исходных параметров модели производится на основе накопленных на глобальном уровне статистических данных и позволяет оптимизировать набор исходных параметров модели в случае каждого конкретного пациента с минимальным увеличением трудоемкости процедуры измерения.

В ходе основного этапа проведения обследования производится последовательный расчет объемно-массовых, жидкостных и других показателей состава

тела человека для каждого сегмента и для всего тела интегрально. По полученным результатам формируется «портрет пациента» и производится его последовательная классификация по признаку принадлежности к разным группам обследуемых. По результатам этой классификации формируется заключение в полуавтоматическом режиме.

В таблице 2 приведены способы расчета основных показателей состава тела и его сегментов человека, используемые в двухчастотном и трехчастотном методах.

Таблица 2

Параметр	Двухчастотный метод	Трехчастотный метод
Объем внеклеточной и внутриклеточной жидкостей	$V_{В/К} = f(\rho, R_{В/К}, L, k_{ст}, V_d)$	$V_{В/К} = f(\rho, R_{В/К}, L, k_{ст}, k_o)$
Объем общей жидкости	$V_{ОЖ} = V_B + V_K$	$V_{ОЖ} = V_B + V_K$
Объем общей воды	$V_{ОВ} = f(V_{ОЖ}, L, m, k_{ст}, V_{ОВд}, V_{ОЖд})$	$V_{ОВ} = f(V_{ОЖ}, L, m_c, k_{ст}, k_o)$
Жировая масса	$m_{ж} = m - m_{БЖ}$	$m_{ж} = m_c - m_{БЖ}$
Безжировая масса	$m_{БЖ} = f(V_{ОВ}, k_{ст})$	$m_{БЖ} = f(V_{ОВ}, k_{ст}, k_{ТТ})$
Клеточная масса	$m_K = f(V_K, k_{ст}, V_{ОВд}, V_{ОЖд})$	$m_K = f(V_K, V_{ОВ}, k_{ст}, k_{ТТ})$
Активная клеточная масса	$m_{АК} = f(m_K, V_K, k_{ст}, V_{ОВд}, V_{ОЖд})$	$m_{АК} = f(m_K, V_K, k_{ст}, k_{ТТ})$
Мышечная масса	$m_{ММ} = f(m_{АК}, V_K, k_{ст}, V_{ОВд}, V_{ОЖд})$	$m_{ММ} = f(m_{АК}, V_K, k_{ст}, k_{ТК}, C_m)$

Расшифровка условных обозначений таблицы: $V_{В/К}$ – объемы внеклеточной или внутриклеточной жидкостей; ρ – удельная проводимость рассчитываемой фракции; L – рост; m – вес; m_c – масса сегмента; $k_{ст}$ – статистический коэффициент; k_o – объемный коэффициент; $k_{ТТ}$ – коэффициент типа телосложения; $V_{ОЖ}$ – объем общей жидкости; $V_{ОВ}$ – объем общей воды; $m_{ж}$ – жировая масса; $m_{БЖ}$ – безжировая масса; m_K – клеточная масса; $m_{АК}$ – активная клеточная масса; $m_{ММ}$ – мышечная масса; $k_{ТК}$ – коэффициент эквивалентной емкости тканей; $V_d, V_{ОВд}, V_{ОЖд}$ – должные значения нормы соответствующих показателей.

Третья глава диссертации посвящена разработке аппаратно-программного комплекса для оценки состава тела человека методом трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии. На рисунке 6 представлена общая структурная схема комплекса.

Данная схема разделена на следующие сегменты по технологическим уровням:

1. *Аппаратный уровень.* Содержит в себе специально разработанное аппаратное обеспечение и разнообразные физические метки. На схеме не отмечены, но

принадлежат аппаратному уровню: персональные компьютеры, серверное оборудование, принтеры, сетевое и прочее вспомогательное оборудование.

2. *Уровень хранилища данных.* Включает в себя все используемые базы данных, в том числе внешние.

3. *Уровень программного обеспечения.*

По уровню обобщения информации выделены следующие уровни:

1. *Локальный уровень.* Характеризует рабочее место врача-диагноста. Включает в себя непосредственно биоимпедансметр и персональный компьютер со специализированным ПО и сетевым доступом (опционально).

2. *Глобальный уровень.* Включает как облачную версию ПО для оценки состава тела человека, так и общее хранилище данных, модуль обработки, классификации и верификации данных, средства телемедицины, систему обновления локального ПО, систему экспорта данных во внешние системы.

3. *Исследовательский уровень.* Объединяет в себе все возможные инструменты исследователя для проведения биоимпедансных исследований и формирования способов классификации различных групп пациентов с разнообразными диагнозами.

Помимо этих уровней на схеме также изображены пациент, врач и исследователь как части биотехнической системы.

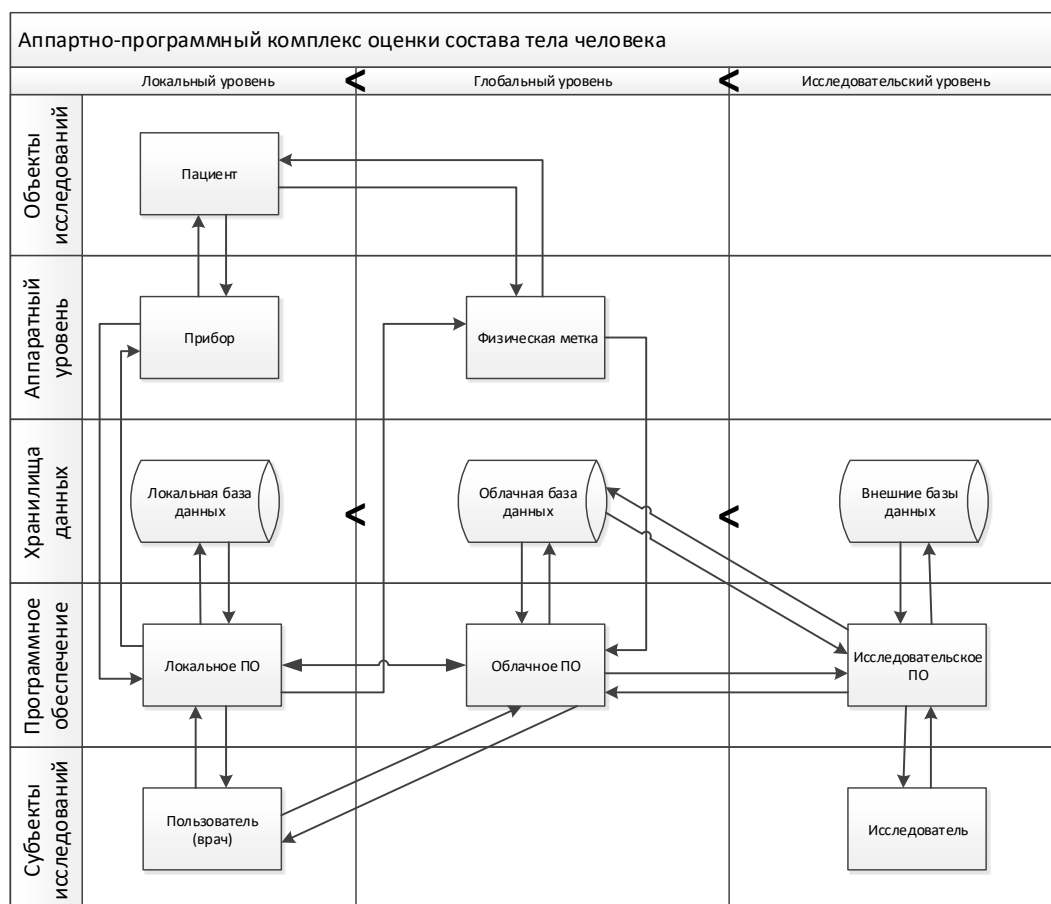


Рисунок 6

Такая структура аппаратно-программного комплекса обеспечивает вариативность исходных параметров модели метода, позволяет проводить новые исследования, незамедлительно интегрируя результаты научно-исследовательской деятельности на глобальном уровне разрабатываемого комплекса

Главной особенностью аппаратной части анализатора состава тела человека является внедрение блоков коммутаторов токовых и потенциальных электродов (КТЭ и КПЭ, рисунок 7), обеспечивающих переключение отведений для измерения импедансов сегментов тела человека.

Он позволяет проводить измерения по сегментарной методике на трех частотах (28, 115 и 460 кГц), сохранять и обрабатывать данные эксперимента, экспортировать результаты измерений и заключение во внешние программы, на печать и в глобальный уровень программного обеспечения с помощью специально разработанного REST API.

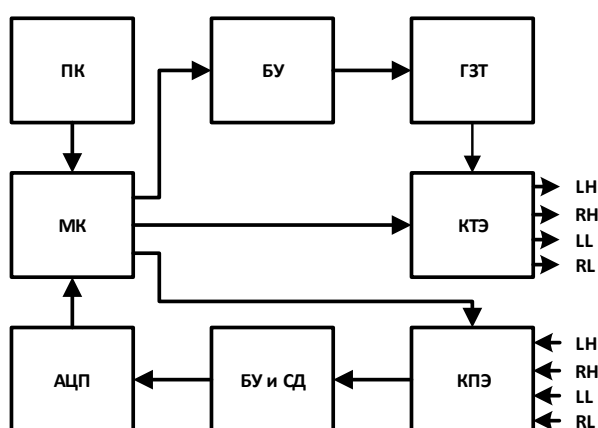


Рисунок 7

Генератор зондирующего тока (ГЗТ) по команде блока управления (БУ) генерирует ток на частотах 28 кГц, 115 и 460 кГц, передает его через КТЭ на токовые электроды, меняет частоту зондирующего тока по сигналу от блока управления микроконтроллера (МК). Измерительный сигнал через блок усилителя и синхронного детектора (БУиСД) и АЦП передается в микроконтроллер для первичной обработки сигнала и дальнейшей его передачи на персональный компьютер (ПК).

В **четвертой главе** описана разработка экспериментального образца аппаратно-программного комплекса оценки состава тела человека методом трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии.

Опытный анализатор состава тела человека был разработан на базе серийного прибора «Диамант АИСТ-ИРГТ» путем введения специального коммутирующего блока и модификации блока генератора зондирующего тока.

Программное обеспечение локального уровня реализовано на платформе .NET Framework на языке C#. Отдельные проекты решения написаны на языке Visual C++.

Опытный образец аппаратно-программного комплекса локального уровня изображен на рисунке 8.

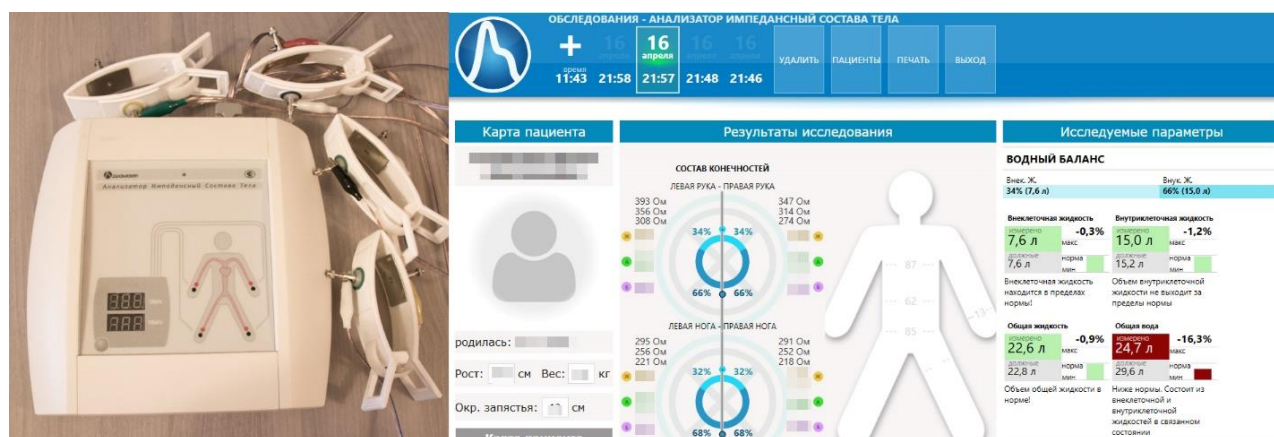


Рисунок 8

Глобальный уровень комплекса построен на MySQL, PHP, Yii Framework. Научно-исследовательский уровень на данный момент построен на тех же технологиях с дополнением в виде локального ПО на языке С# и платформе .NET.

Для исследования опытного образца был собран специальный тестовый стенд (физическая модель тела человека), позволяющий изменять сопротивления R_v , R_k и емкость C_k . В рамках эксперимента были выполнены следующие операции на выборке из 13 здоровых обследуемых разного возраста и типа телосложения:

1. Измерение с помощью опытного образца импедансов тела человека и его сегментов по методу трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии.
2. Расчет значений R_v , R_k и C_k согласно предлагаемому методу.
3. Настройка тестового стенда по полученным R_v , R_k и C_k .
4. Измерение с помощью опытного образца импеданса на тестовом стенде.
5. Статистическая обработка и сравнение результатов исследования.

Результаты эксперимента сведены в таблицу 3.

Эксперимент показывает, что экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса позволяет оценивать эквивалентную емкость клеточной мембраны и сопротивления внеклеточной и внутриклеточной жидкости с допустимой погрешностью.

Таблица 3

Показатель	М.О.	СКО	Дов. интервал
$Z_{28}, \text{ Ом}$	281.7	62.1	37.5
$\Delta Z_{28}, \text{ Ом}$	-0.2	1.0	0.65
$Z_{115}, \text{ Ом}$	247.4	56.4	34.1
$\Delta Z_{115}, \text{ Ом}$	-0.4	0.65	0.39
$Z_{460}, \text{ Ом}$	217.7	49.8	30.1
$\Delta Z_{460}, \text{ Ом}$	-0.2	0.8	0.5

В рамках апробации метода были проведены обследования методом трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии на следующих группах пациентов: группа здоровых обследуемых, группа людей с повышенной мышечной массой (как пример, в таблице 4 приведена оценка показателей состава тела человека методами двухчастотного БИА, трехчастотного БИА и контрольным методом двумерной денситометрии для этой группы пациентов), группа пациентов с ожирением 1-2 степени, группа пациентов кардиологических отделений с ярко выраженными отеками конечностей.

Таблица 4

N=16, P = 0.95	ЖМ	%ЖМ	ММ	%ММ
<i>Трехчастотная биоимпедансометрия</i>				
Измеренное значение	15,7±2,0 кг	21,5±2,7%	54,7±6,8 кг	73,3±3,2%
Абсолютное отклонение	1,1±1,24 кг	0,1±1,8%	1,2±1,6 кг	-0,8±2,8%
Относительное отклонение	8,5±7,8%	0,7±7,9%	2,5±3,5%	-1,1±3,8%
<i>Двухчастотная биоимпедансометрия</i>				
Измеренное значение	18,6±2,8 кг	24,7±1,71%	36,1±3,8 кг	55,1±3,5%
Абсолютное отклонение	4,1±1,5 кг	3,3±1,54%	-17,4±2,9 кг	-19,0±3,6%
Относительное отклонение	26,3±3,5%	15,7±7,9%	-32,1±1,8%	-25,6±4,8%
<i>Двумерная денситометрия</i>				
Измеренное значение	14,6±1,5 кг	21,4±1,5%	53,5±6,5 кг	74,0±1,0%

В **заключении** приведены основные результаты работы: для достижения цели исследования – повышения точности оценки состава тела человека с помощью метода биоимпедансометрии – было разработано методическое и программно-алгоритмическое обеспечение системы оценки состава тела человека с помощью трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии.

Все поставленные задачи исследования выполнены в полном объеме. Цель исследования достигнута. В процессе проведения исследования получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен и обоснован метод трехчастотной биоимпедансометрии. По результатам моделирования обоснованы необходимость использования и выбор третьей частоты зондирующего тока в целях повышения точности измерения объема внутриклеточной жидкости. Отказ от использования статистических компонент, основанных на различных системах должных показателей.
2. Разработаны усовершенствованная сегментарная пятизвенная модель состава тела человека и метод оценки состава тела человека на основе этой модели с помощью трехчастотной биоимпедансометрии. Обеспечена широкая вариативность исходных параметров модели на основе антропометрических данных пациента.
3. Разработана структура многоуровневого распределенного в пространстве аппаратно-программного комплекса, предназначенного для оценки состава тела

человека с помощью метода трехчастотной сегментарной биоимпедансометрии и научно-исследовательской деятельности.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Волков Н.Ю., Илларионов В.В., Соловьев М.Н., Юлдашев З.М. Метод оценки объемов внеклеточной и внутриклеточной жидкости тела человека с помощью трехчастотной биоимпедансометрии // Биотехносфера – 2018 – №1 – с.19-22
2. Юлдашев З.М., Соловьев М.Н. Усовершенствованная методика исследования состава тела человека с помощью двухчастотной биоимпедансометрии // Биомедицинская Радиоэлектроника – 2016 – №8 – с.69-73
3. Соловьев М.Н., Юлдашев З.М., Волков Н.Ю., Илларионов В.В. Метод и система для анализа состава тела // Биотехносфера – 2015 – №4 – с.28-31

Публикации в других изданиях:

4. “Оценка состава конечностей человека с помощью двухчастотной биоимпедансометрии”, конференция “Биомедсистемы-2017”, г. Рязань, 6-8 декабря 2017 г, материалы конференции, с. 524-526.
5. “Аппаратно-программный комплекс для оценки состава тела человека”, “Энергосбережение и эффективность в технических системах, 4-я международная НТК”, г. Тамбов, 10-12 июля 2017, материалы конференции, с. 517-518.
6. “Алгоритм проведения исследования оценки состава тела человека с помощью двухчастотной биоимедансометрии”, “Энергосбережение и эффективность в технических системах, 4-я международная НТК”, г. Тамбов, 10-12 июля 2017, материалы конференции, с. 516-517.
7. “Аппаратно-программный комплекс оценки и исследования состава тела человека”, “Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах, 3-я международная НТК”, г. Тамбов, 25-27 апреля 2016, сборник тезисов, с. 429-430.
8. “Методы итоговой коррекции оценки жировой массы в программно-аппаратном комплексе анализа состава тела человека”, “Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах, 3-я международная НТК”, г. Тамбов, 25-27 апреля 2016, сборник тезисов, с. 428-429.
9. “Система для оценки объемов внеклеточной и внутриклеточной жидкостей с помощью двухчастотной биоимпедансометрии”, конференция “Кардиостим-2016”, г. Санкт-Петербург, 18-20 февраля 2016 г., сборник тезисов, с.226
10. “Система оценки импедансов тканей при исследовании мышечной массы”, “Юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио”, г. Санкт-Петербург, 21–29 апреля 2015 г., труды

конференции, с.146-147

11. “Метод оценки проводимости тканей при исследовании мышечной массы”, “Юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио”, г. Санкт-Петербург, 21–29 апреля 2015 г., труды конференции, с.145-146
12. “Аппаратно-программный комплекс для определения состава тела человека двухчастотным биоимпедансным методом”, конференция “БИОМЕДСИСТЕМЫ – 2014”, г. Рязань, 10-12 декабря 2014 г., материалы конференции с. 184-187.
13. “Двухчастотный биоимпедансный метод исследования состава тела человека”, конференция “БИОМЕДСИСТЕМЫ – 2014”, г. Рязань, 10-12 декабря 2014 г., материалы конференции с. 182-183.
14. “Определение состава тела человека по результатам биоимпедансного исследования”, “XV международная НТК по мягким вычислениям и измерениям (SCM`2012)”, г. Санкт-Петербург, 25-27 июня 2012 г. , сборник докладов, с. 93-97.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

15. Программа для измерений импедансов и оценки внеклеточной и внутриклеточной жидкостей тела человека: программа для ЭВМ №2016612759 Рос. Федерация / М.Н. Соловьев, З.М. Юлдашев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2016610065; заявл. 11.01.16; опубл. 09.03.2016.