

УДК 534.7

## Лабораторный измерительно-вычислительный комплекс для стабилметрических исследований

*Р.М. Утемесов, Е.А. Шимко*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

## The Laboratory Measuring and Computing System for Stabilometric Studies

*R.M. Utemesov, E.A. Shimko*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Статья посвящена разработке цифрового измерительно-вычислительного комплекса для проведения стабилметрических исследований. За основу взята стабиллоплатформа электромеханического типа. Приводится блок-схема разработанного устройства. Проведен анализ выбора электронных компонентов устройства. Установка разработана на основе микроконтроллера ATmega328 на плате Arduino Uno R3. В качестве аналого-цифрового преобразователя использована плата HX711. Для измерения сил давления пациента применены тензодатчики 50 кг. Приводятся основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики разработанной стабилметрической платформы. Приведена физическая модель разработанного устройства. Описан алгоритм и приведена блок-схема вычисления основных стабилметрических показателей (длины стабиллограммы, модулей и направлений скоростей, угловых скоростей, факторов динамической стабилизации). Приведены примеры пробных стабилметрических исследований. Пробные измерения и вычисления показали, что сконструированная установка удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к устройствам для стабилметрии. Установка позволяет регистрировать и вычислять пространственные и временные характеристики движения человека.

**Ключевые слова:** компьютерная стабилметрия, стабилметрическая платформа, тензодатчик, статокинезиограмма.

**DOI:** 10.14258/izvasu(2021)4-10

### Введение

Глобальной тенденцией нашего времени является цифровизация всех сфер деятельности. Медицинская отрасль — не исключение. Одна из задач медицинской диагностики — создание цифровизированного медицинского диагностического оборудования. Одним из методов, нашедших эффективное применение в ме-

The article is devoted to the development of the digital measuring and computing system for conducting stabilometric studies. The proposed system is based on an electromechanical stability platform. The block diagram of the developed system is presented. The selection of electronic components for the system is analyzed. The developed system is based on the ATmega328 microcontroller on the Arduino Uno R3 board. The HX711 board is used as an analog-to-digital converter. Strain gauges of 50 kg are used to measure the patients' pressure forces. The overall design, technological, technical, and operational characteristics of the developed stabilometric platform are presented in the paper. The physical model of the developed system is shown. The operating algorithm is described, and the block diagram for calculation of the main stabilometric indicators (the length of the stabilogram, the modules and directions of the velocities, angular velocities, and dynamic stabilization factors) is presented. There are several examples demonstrating test operations of the developed system. Trial measurements and calculations have shown that the designed system fully meets the technical requirements for stabilometry equipment. The developed measuring and computing system allows registration and calculation of the spatial and temporal characteristics of patients' motions.

**Key words:** the computer stabilometry, the stabilometric platform, the strain gauge, ADC.

дицине, является стабилметрия. Стабилметрия — это метод диагностики нарушения равновесия у людей. Суть метода компьютерной стабилметрии заключается в рассмотрении биомеханических показателей человека в процессе принятия и поддержания им вертикальной позы в положении стоя или сидя. Важное значение стабилметрии для медицины связано с удоб-

ством применения метода и его эффективностью. С помощью стабилотографии можно оценить функциональное состояние человека, диагностировать двигательные нарушения, производить процесс реабилитации, прогнозировать результаты лечения и т.д. [1].

Стабилометрические исследования проводятся при помощи стабилометрических платформ. Стабилометрическая платформа — это неподвижная плоская поверхность, на которой по краям находятся датчики, измеряющие силу, приложенную к ним [2]. Такая платформа предназначена для определения положения центра давления (ЦД) пациента и отклонения его от положения равновесия. Современное измерительно-вычислительное устройство для компьютерной стабилотрии должно отвечать следующим требованиям: простота конструкции, ком-

пактность, наглядность и доступность аппаратной и программной частей, простота использования, интуитивно понятный интерфейс, длительное время работы, возможность модернизации устройства и ряд других.

#### Аппаратное обеспечение стабилометрического комплекса

За основу разрабатываемого устройства была взята стабилотформа электромеханического типа, поскольку платформы этого типа по сравнению с гидравлическими и пневматическими устройствами более просты в изготовлении и нашли наибольшее применение в медицинской практике. Структурная схема разработанной стабилометрической платформы приведена на рисунке 1.

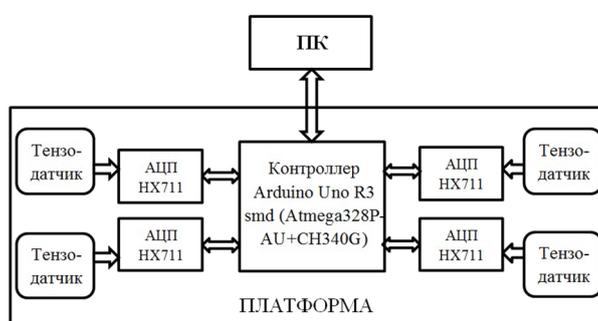


Рис. 1. Структурная схема стабилометрической платформы

В качестве электронной основы установки был выбран микроконтроллер ATmega328 на плате Arduino Uno R3. Данная плата имеет необходимое количество цифровых и аналоговых входов и выводов, встроенный АЦП и ЦАП, C++ подобный язык программирования [3].

В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) была выбрана плата HX711. АЦП HX711-24-бит используется в качестве АЦП для тензодатчиков, весов, Arduino и может использоваться в проектах на микроконтроллерах, где нужно точно снимать показания с тензодатчиков [4].

Для работы необходимо подключить АЦП HX711 к тензодатчикам (по мостовой схеме), к Arduino контроллеру и подать питание. АЦП HX711 имеет два разъема для подключения к тензодатчикам, для подключения к контроллеру и для подачи питания.

Подача питания на плату АЦП HX711 может осуществляться как от Arduino контроллера, так и от внешнего источника питания.

В качестве датчика силы в разработанном комплексе применен тензодатчик 50 кг. В конструкции стабилотформы используется четыре датчика. Тензодатчик 50 кг — тензорезистивный датчик, предназначенный для создания на его основе весов, датчиков давления или концевых датчиков [5]. Следует отметить, что стабилотформа и весы имеют прак-

тически одинаковую электронно-механическую конструкцию. Основное отличие заключается в программной обработке получаемых цифровых данных.

В основе своей конструкции датчик имеет тонкопленочные резисторы, которые изменяют свое сопротивление при деформации. Данные резисторы образуют полумост, который необходимо либо дополнить резисторами до полного моста, либо подключить вместе с другим датчиком или датчиками, после чего данную связку можно подключить непосредственно к АЦП.

В качестве механической основы установки использована квадратная платформа размерами 70x70x2 см. Также на нижней стороне платформы смонтирована вся аппаратная часть устройства (микроконтроллер Arduino Uno R3 (ATmega328) и АЦП HX711). Для снятия показаний с каждого датчика использована отдельная АЦП. Все четыре АЦП подключены к микроконтроллеру. Дополнительно использована макетная плата для подведения питания к АЦП. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок при монтаже устройства применены экранированные провода. Такая конструкция обеспечивает наглядность и простой доступ к любому электронному компоненту стабилотформы. Установка позволяет проводить измерения с частотой 1 Гц.

Подключение к ПК осуществляется через стандартный интерфейс USB. Посредством USB-кабеля осуществляется питание микросхем и происходит обмен цифровыми данными между микроконтроллером и ПК.

**Физическая модель и методика вычисления стабилметрических показателей**

Разработка программного обеспечения для взаимодействия микроконтроллера и ПК производилась в среде Arduino IDE на C++ подобном языке программирования. Показания датчиков выводятся в элект-

ронную таблицу MS Excel в режиме реального времени. Для этого был использован макрос PLX-DAQv2. Вывод данных в Excel обеспечивает наглядность процесса измерений и возможность быстрого анализа данных и построения графиков.

В качестве пробных измерений проводилась простая статическая стабилметрическая проба (тест Ромберга) [6].

Обратимся к физической модели стабилметрической платформы (рис. 2).

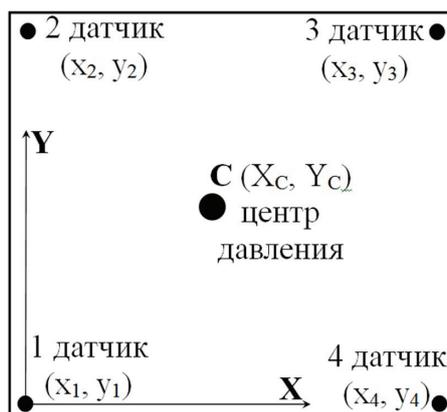


Рис. 2. Физическая модель стабилметрической платформы

В первую очередь необходимо вычислить координаты центра давления пациента (т.е. координаты  $X_C$ ,  $Y_C$  точки C) [7]. Это необходимо для построения статокинезиограммы (траектории движения центра

давления в плоскости опоры) и для дальнейших вычислений. Запишем систему уравнений равновесия стабиллоплатформы:

$$G - P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0$$

$$G \cdot Y_C - P_2 \cdot y_2 - P_3 \cdot y_3 = 0$$

$$G \cdot X_C - P_3 \cdot x_3 - P_4 \cdot x_4 = 0$$

Откуда выразим вес и координаты центра тяжести:

$$G = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \tag{1}$$

$$X_C = \frac{P_3 \cdot x_3 + P_4 \cdot x_4}{G} \tag{2}$$

$$Y_C = \frac{P_2 \cdot y_2 + P_3 \cdot y_3}{G} \tag{3}$$

где  $G$  — сила тяжести пациента (вес пациента),  $P_{1..4}$  — силы давления на датчики (силы реакции датчиков),  $x_{1..4}$ ,  $y_{1..4}$  — координаты датчиков (расстояния между датчиками),  $X_C$ ,  $Y_C$  — координаты центра давления пациента [8].

С течением времени положение центра давления будет перемещаться в плоскости опоры. В рассмотрении характеристик этого движения и заключается метод стабилметрии. Алгоритм дальнейших вычислений основных стабилметрических показателей изображен на рисунке 3.

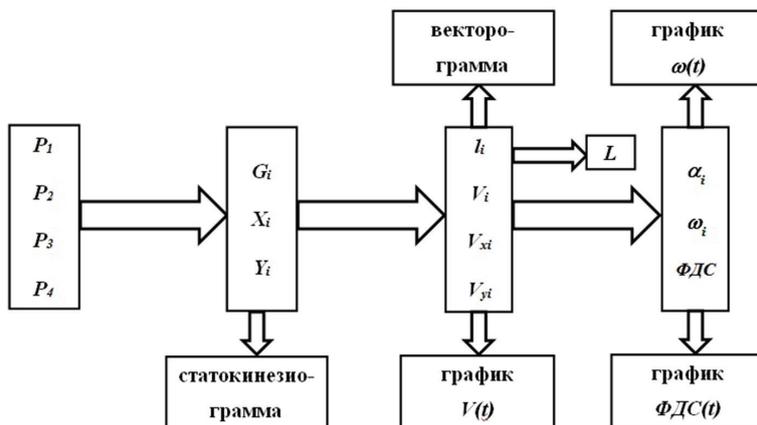


Рис. 3. Схема вычисления основных стабилметрических показателей

Показания тензодатчиков  $P_1 - P_4$  получаются со стабиллоплатформы. Вначале вычисляются вес испытуемого  $G_i$  и координаты центра давления в текущий момент времени  $X_i, Y_i$  по формулам (1-3). По этим значениям строится статокинезиограмма (рис. 4а). Для удобства восприятия начало координат помещено в математический центр статокинезиограммы.

Далее вычисляются расстояния между положениями ЦД в текущий и предыдущий моменты времени  $l_i$  и полная длина статокинезиограммы  $L$ . Хотя эти параметры имеют большую диагностическую значимость, однако они являются статическими и не отражают динамику процесса.

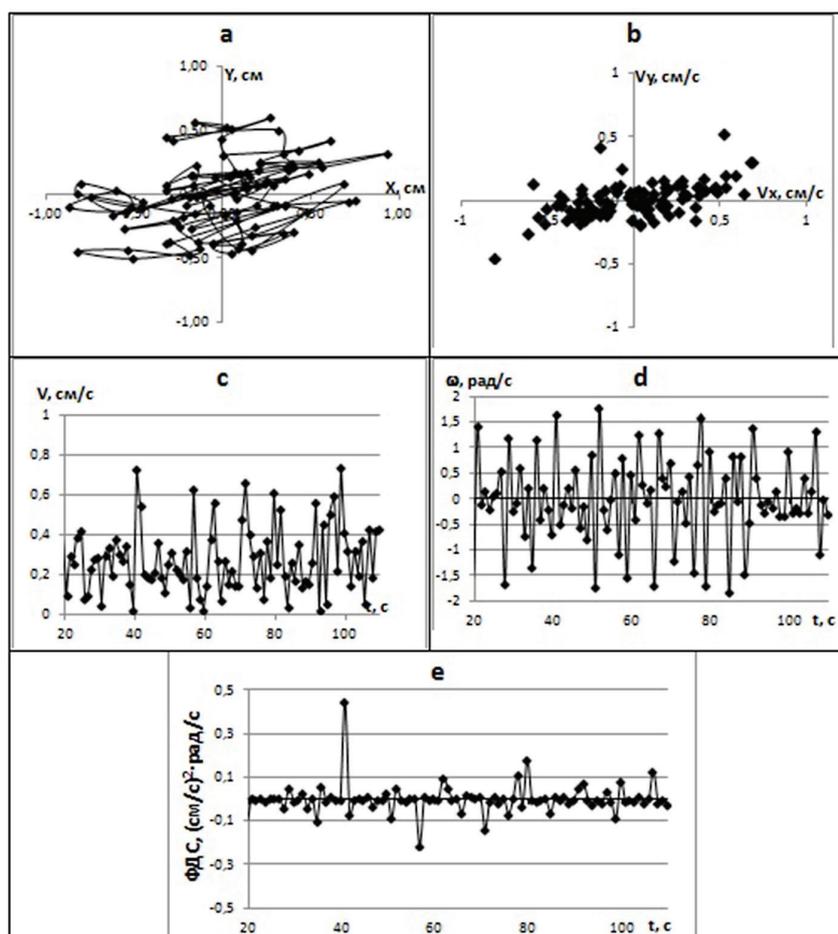


Рис. 4. Типичные графики стабилметрических характеристик: а — статокинезиограмма, б — векторограмма, с — модуль линейной скорости, d — угловая скорость, е — фактор динамической стабилизации

Поэтому далее вычисляются векторные характеристики [9, 10]. Вычисляются проекции средней линейной скорости движения ЦД в промежутке между двумя измерениями на оси координат  $V_{x_i}$ ,  $V_{y_i}$ . Строится векторограмма, т.е. статокинезиограмма в фазовом пространстве проекций скоростей (рис. 4б). Векторограмма позволяет определить преобладающие направления колебаний тела пациента (в приведенном примере преобладают колебания во фронтальной плоскости). Также вычисляется модуль средней скорости движения ЦД в промежутке между двумя измерениями  $V_i$ . Строится график  $V(t)$  (рис. 4с).

У здорового человека скорость движения ЦД должна быть минимальной. Наличие у человека поражений вестибулярной системы приводит к задержкам и ошибкам в коррекции отклонений тела от положения равновесия. Это выражается в увеличении линейной скорости перемещения ЦД и резких изменениях направления его движения [2, 10–12].

Зная проекции средней скорости на оси координат, можно вычислить направление вектора средней скорости (угол  $\alpha_i$  между вектором скорости и горизонтальной осью) в текущий момент времени. После этого можно вычислить среднюю угловую скорость  $\omega$  поворота вектора  $V_i$  в промежутке времени между двумя измерениями и построить график угловой скорости  $\omega(t)$  (рис. 4д).

В итоге вычисляется фактор динамической стабилизации (ФДС). ФДС — это площадь эллиптического сектора на векторограмме, который описывает вектор средней скорости за промежуток времени

между двумя измерениями. Строится график  $\PhiДС(t)$  (рис. 4е). Все вычисления проводятся конечно-разностным методом.

Анализ динамики линейной и угловой скоростей ЦД и ФДС показал нелинейный (стохастический) характер их изменения. Угловая скорость и ФДС периодически принимают положительные и отрицательные значения.

Были проведены стабилметрические исследования 10 испытуемых и построены графики основных стабилметрических показателей (рис. 4). Общее отклонение веса на стабилплатформе от стандартных весов в среднем составило 2,5 %. Для каждого испытуемого со стабилплатформы снималось 100 измерений. Полученные результаты показывают, что сконструированный стабилметрический комплекс удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к устройствам для стабилметрии [9], и результаты находятся в согласии с имеющимися литературными данными [10–12].

#### Выводы

Разработанный измерительно-вычислительный стабилметрический комплекс позволяют надежно регистрировать скалярные и векторные стабилметрические показатели. Этот комплекс может быть использован для проведения стабилметрических исследований с целью дальнейшего развития математического аппарата стабилметрии, а также при подготовке технических специалистов медицинской отрасли.

## Библиографический список

1. Гроховский С.С., Кубряк О.В. Метрологическое обеспечение стабилметрических исследований // Медицинская техника. 2014. № 4.
2. Мураенко А.А. Мониторинг состояния человека на основе анализа биодинамических данных, полученных со стабилметрической платформы // Математика и ее приложения: фундаментальные проблемы науки и техники : сб. трудов Всероссийской конф. Барнаул, 24–26 ноября, 2015. Барнаул, 2015.
3. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino. СПб., 2012.
4. Шишов О.В. Проектирование аналого-цифровых контрольно-управляющих микропроцессорных систем. Саранск, 2001.
5. Тензодатчик: принцип работы, устройство, типы, схемы подключения. URL: <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html> (дата обращения: 24.05.2020).
6. Сковрцов Д.В. Стабилметрическое исследование: краткое руководство. М., 2010.
7. Кручинин П.А. Механические модели в стабилметрии // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 2.
8. Lafond D., Duarte M., Prince F. Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment // Journal of Biomechanics. 2004. Vol. 37.
9. Усачев В.И., Артемов В.Г., Кононов А.Ф. Способ оценки функционального состояния человека (ИДС). Патент на изобретение № 2380035. М., 2010 (приоритет от 26.01.2009 г.).
10. Доценко В.И., Усачев В.И., Морозова С.В., Скедина М.А. Современные алгоритмы стабилметрической диагностики постуральных нарушений в клинической практике // Медицинский совет. 2017. № 8. DOI: 10.21518/2079-701X-2017-8-116-122.
11. Sliva S.S. Domestic computer stabilography: Engineering standards, functional capabilities, and fields of application // Biomedical Engineering. 2005. № 1. Vol. 39.
12. Stergiou N., Decker L.M. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? // Human Movement Science. 2011. Vol. 30.