

УДК 531.768:612.766

М.Ю. Катаев, Н.Г. Катаева, Р.А. Чернов

Оценка параметров ходьбы человека с помощью двух акселерометров

Решение задачи оценки параметров ходьбы человека при использовании нескольких акселерометров, закрепленных на теле человека, является основой данной статьи. Приводится решение, которое позволяет получать корректные данные о пространственном перемещении конечности человека во времени и пространстве. Такой подход, по мнению авторов, может быть использован для диагностики состояния опорно-двигательного аппарата человека.

Ключевые слова: датчик, акселерометр, походка человека, методика.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-51-55

Наблюдение за движением человека и использованием этого в различных целях (медицина, война и др.) выполняется уже не одну тысячу лет [1]. В настоящее время наблюдение становится цифровым и позволяет выполнять измерение и анализ двигательных функций человека в разных направлениях: медицина, спорт, военная подготовка, автомобилестроение и др. Цифровые формы измерений позволяют в настоящее время оценивать характеристики движения тела человека не только во фронтальном, сагиттальном, но и в трехмерном пространстве. Один из самых популярных подходов связан с использованием компьютерного зрения и алгоритмов обработки изображений. Кроме плюсов, для каждого изображения есть и недостатки, связанные с условиями измерений: сцена, освещенность, тени и др.

Большинство методик нацелено на применение маркеров на теле человека, для обработки данных изображений при этом требуется дорогостоящее аппаратное обеспечение (видеокамеры, вычислительная техника). Кроме того, для изображения четко определенной является сцена, имеющая небольшой размер, позволяющая фиксировать лишь несколько шагов. Возможны и варианты использования более простых подходов обработки и дешевых камер, например, как в работе [2]. Однако все же изображение является проекцией трехмерного мира и лишь частично, в виде некоторой модели отражает изменение положения тела человека в пространстве.

В последнее время технические характеристики устройств измерения (точность, надежность, минимальный размер и др.) положения тела человека в пространстве значительно улучшились, что дает возможность использовать их в практических работах медицины, спорта и т.д. Одним из таких устройств является смартфон и его уже штатный элемент – акселерометр. Применение акселерометров в медицине является важным, так как позволяет выполнять оценку параметров движения человека в пространстве и времени. Активно эти устройства применяются и в спортивных датчиках, которые позволяют определять число и темп шагов. Отметим, что большинство исследований основывается на обработке данных одного акселерометра.

Цель данной работы заключается в проектировании и реализации программно-аппаратного комплекса для сбора, обработки и анализа данных о ходьбе человека, полученных при помощи двух акселерометров.

Ходьба человека

Ходьба человека – это циклическое перемещение ног человека с решением задачи равновесия. При таком перемещении каждая нога проходит несколько фаз движения, связанных с отталкиванием ноги от поверхности, переносом ноги в воздухе и касанием ноги поверхности. Надо заметить, что при ходьбе человека его тело смещается вверх, вниз с в такт движения и при этом одна из ног всегда связана с поверхностью. Упор на поверхность выполняется то на одну ногу, то на обе ноги в момент переноса тела. Характеристикой движения являются время и длина шага правой и левой ногой, а также двойной шаг, равный сумме длин шагов правой и левой ногой. Каждый шаг правой и левой ногой состоит из заднего и переднего. Задний шаг – это та часть шага, когда нога находится сзади линии, проходящей перпендикулярно к поверхности через тело человека, а передний шаг наоборот, когда нога расположена впереди. В процессе движения шаг правой, левой ногой, а также двойной шаг характеризуют движение человека через такие параметры, как симметричность, ритмичность и др.

Для того чтобы находить параметры походки человека, типично восстанавливают такую характеристику, как центр масс (ЦМ) тела. Изучением поведения ЦМ можно вычислить длину каждого шага, двойного шага и на этой основе скорость перемещения и ритмичность [3]. Определение длины шага связано с пониманием базы опоры, т.е. расстояния от одной пятки до другой, при этом, кривая ЦМ принимает либо максимальные или минимальные значения. В принципе время на отталкивание может показать стиль ходьбы, что важно для различных диагностических задач. Важным для человека является ритмичность походки, когда сравнивается время переноса правой или левой ноги в разных фазах движения, а также для двойного шага. Например, у здорового человека ритмичность близка к единице, а

у человека с заболеваниями может быть меньше, что опять является важным для диагностики параметром. Такая характеристика, как скорость ходьбы, показывает, сколько сделал человек шагов за определенный промежуток времени. Заметим, что характеристики походки существенно зависят от массы тела, высоты и формы фигуры человека.

Акселерометр

Акселерометр – это устройство, позволяющее измерять проекцию кажущегося ускорения или разности между истинным ускорением некоторой массы, расположенной в устройстве, и гравитационным ускорением. При перемещении человека возникают отклонения массы от исходного положения, что и является основой для оценки величины ускорения. Существует несколько видов акселерометров: однокомпонентные, двухкомпонентные и трехкомпонентные, что позволяет измерять ускорение вдоль одной, двух или трех осей $\{XYZ\}$. Отдельные акселерометры содержат в себе системы сбора, обработки и передачи данных.

Параметры, по которым можно подбирать акселерометры: 1) масштабный коэффициент, являющийся пропорциональным измеряемым ускорением и выходным сигналом; 2) пороговая чувствительность – определяет минимальную величину измеряемого ускорения; 3) смещение нуля показывает величину ускорения в состоянии покоя прибора; 4) случайное блуждание – это среднеквадратичное отклонение ускорения от нуля и 5) нелинейность – показывает зависимость между выходным сигналом и ускорением [4].

Измерение угла наклона тела человека акселерометром при ходьбе основано на измерении проекции вектора силы тяжести на ось измерения. Акселерометр чувствителен не только к действию ускорения свободного падения, но и ускорения, вращения или вибрации [5, 6]. За счет того, что эти ускорения также воздействуют на оси датчиков акселерометра, они искажают действие ускорения свободного падения, что приводит к зашумлению измерений.

Единицами измерения акселерометра являются три ускорения по осям A_x , A_y , A_z , которые позволяют построить общее ускорение A :

$$A(k) = \sqrt{\{A_x^2(k) + A_y^2(k) + A_z^2(k)\}}. \quad (1)$$

Разрабатываемое устройство

Для работы выбран трехосный акселерометр MPU6050 [<https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>], который возвращает данные по осям $\{XYZ\}$. Данный акселерометр позволяет считывать ускорения в трех проекциях на оси $\{XYZ\}$. Это дает возможность определять перемещение прибора, закрепленного на человеке: углы крена, дифферента (тангажа) по таким параметрам, как вектор силы тяжести и скорость вращения. При движении человека можно таким устройством определять линейное ускорение и угловую скорость по трем осям.

В устройстве MPU6050 расположено два устройства: акселерометр и гироскоп. После считывания, предварительной обработки результаты передаются по последовательному интерфейсу I2C в микроконтроллер. Получаемые данные измеряются в величинах LSB (Least Significant Bit или наименьший значащий бит), которая зависит от уровня измеряемого сигнала. Так как ходьба – это направленное движение во времени и пространстве, то измеряемые данные переводятся в ускорение (m/c^2) [7]. В текущей аппаратной части для продуктивной обработки данных и получения истинной картины используется чувствительность $\pm 2g$, где g – ускорение свободного падения.

Для нахождения ускорения по оси X используется преобразование $gX = \text{accelX}/16384.00$, где accelX – наименьший значащий бит на оси X . Значение LSB находится в диапазоне от $-32\,768$ до $+32\,768$ бит. После преобразования получаем ускорение от $-2,00$ до $+2,00$ m/c^2 .

Для разработки аппаратной части была выбрана платформа Arduino, которая представляет собой открытую платформу, способную соединять в едином интерфейсе разные электронные устройства. Соединенными через Arduino устройствами можно управлять или использовать их автономно. Платформа состоит из аппаратной и программной частей, которые позволяют работать с разнообразными устройствами. Для программирования используется версия языка программирования C++ под названием Wiring. Arduino Uno это микроконтроллер на базе процессора Atmega328. Платформа содержит 14 цифровых входов и выходов (6 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсной модуляции), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.

Чип ESP8266 представляет собой мини-микроконтроллер с WiFi-передатчиком, который может работать независимо от платформы, т.е. автономно, без подключения к плате Arduino. Для передачи информации о температуре и влажности применяется модуль ESP-01. Чип ESP8266 позволяет управлять устройством удаленно и пересылать результаты через интернет. Устройство можно подключать к социальным сетям и реагировать на данные, которые передаются через API от веб-сервисов. Микроконтроллер имеет 2 аналоговых выхода, что позволяет подключить без дополнительных доработок датчики типа MPU по разным адресам. На рис. 1 показана схема подключения аппаратной части.

На рис. 2 показан один из вариантов крепления устройства на теле человека. Таких вариантов может быть много, например, такие пары, как (стопа–колени), (колени–бедро), (пояс–грудь), (голова–грудь) и т.д. Эти комбинации датчиков позволяют оценить перемещение фигуры человека в пространстве с высокой точностью, быть калибровочными значениями для методов технического зрения [8] и др.

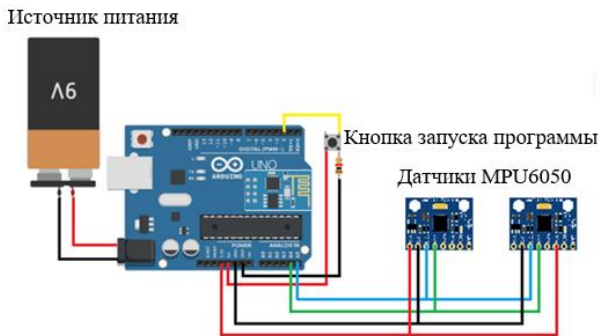


Рис. 1. Схема подключения аппаратной части



Рис. 2. Один из вариантов крепления устройства на теле человека

Полученные результаты

На основе вышепредставленных устройств был разработан программно-технический комплекс, который в действии показан на рис. 2. Для взаимодействия датчиков с устройством накопления информации было написано клиент-серверное приложение, позволяющее последовательно опрашивать датчики с высокой частотой. При таком варианте измеряемые сигналы являются зашумленными, что требует применения методики сглаживания, представленной формулой (5) [9]. Полученные результаты анализировались отдельно на более мощном компьютере.

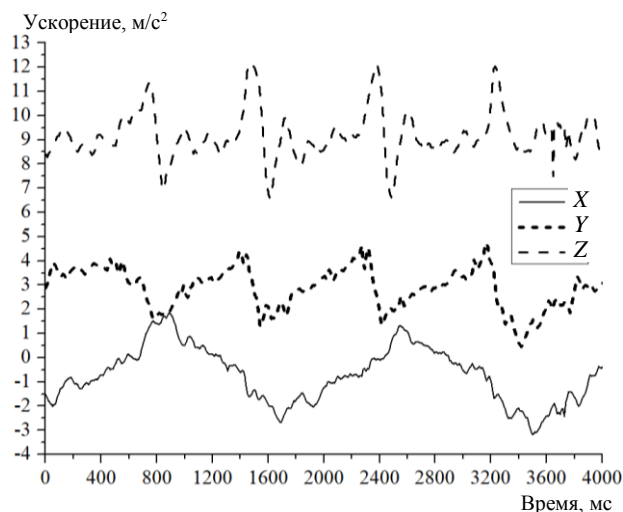


Рис. 3. Измеренные ускорения акселерометром по трем осям

Результаты измерения ускорения, при движении человека по трем осям (X, Y, Z), получаемые с одного акселерометра, показаны на рис. 3.

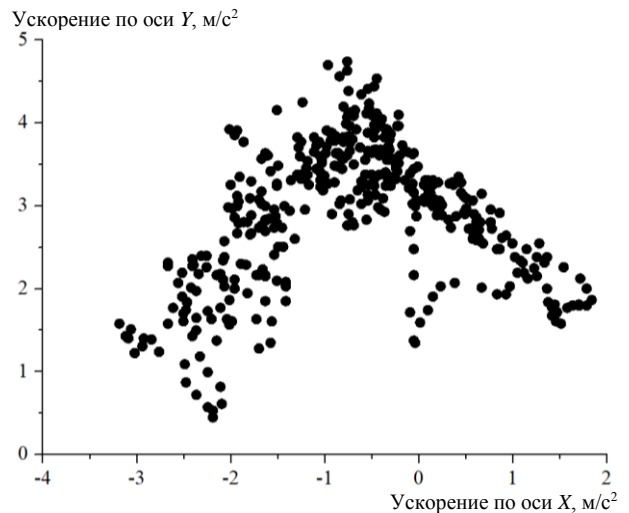


Рис. 4. Совместное представление измерений ускорения акселерометром в плоскости X и Y

Из рис. 3 видно, что кривая, показывающая ускорение по оси X, отражает общее перемещение корпуса за время движения (два двойных шага), кривые по осям Y и Z показывают число шагов (2 шага правой и 2 шага левой ногой) и стиль движения человека [10, 11].

Интересным является совместное представление измерений ускорения акселерометром в плоскости X и Y (рис. 4) [12]. Хорошо видно, что при движении не наблюдается симметрии перемещения фигуры человека и перемещение более регулярное для одной ноги, чем для другой (при движении корпус заваливается в одну сторону).

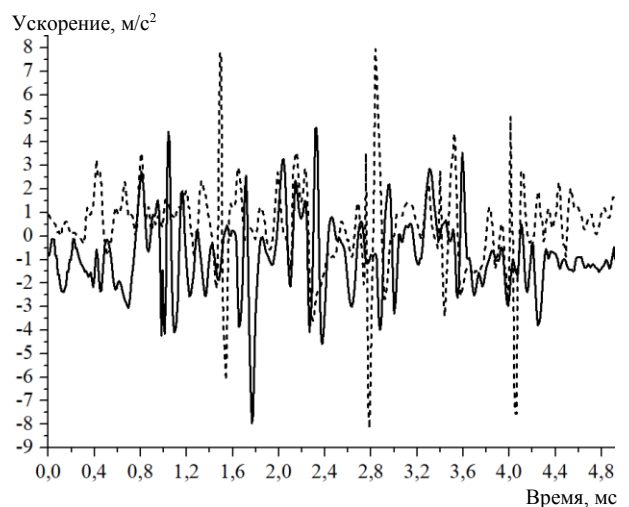


Рис. 5. Сравнение ускорений по оси X для правого (сплошная кривая) и левого колена (пунктирная кривая) в процессе движения

На рис. 5 показано сравнение движения человека при установке акселерометров на правом и левом колене. Видно, что движения, выполняемые левой ногой, более регулярные, чем правой, и это

подтверждает выводы, полученные при анализе информации, представленной на рис. 4.

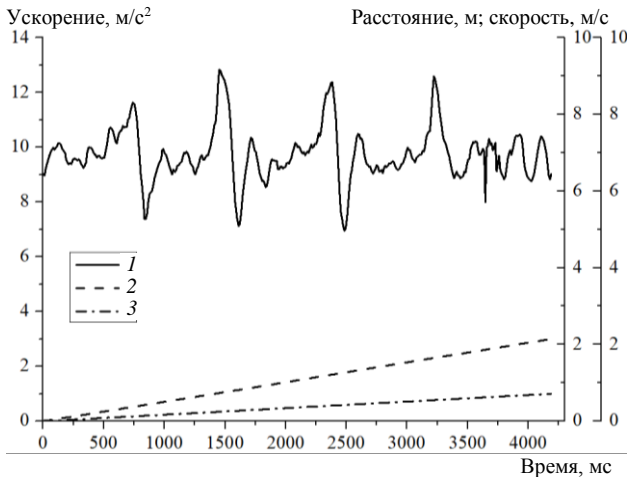


Рис. 6. Оценка ускорения (1), пройденного расстояния (2) и скорости (3) в процессе движения

На рис. 6 показаны результаты оценки скорости и расстояния, пройденного в процессе движения. Скорость движения составила 1,15 м/с, а пройденное расстояние 3,2 м, что составляет средний размер шага 0,8 м при 4 сделанных шагах, и это является типичным для движения человека [11].

Заключение

В ходе выполнения данной работы получены следующие результаты: разработаны структура и программная часть клиент-серверного приложения [13], в котором реализованы алгоритмы сбора, хранения и минимальной обработки данных о ходьбе человека. Анализ результатов измерения позволил найти устойчивый алгоритм сглаживания шумовой составляющей. Итоговая версия сборки аппаратной и программной части [14] позволила собрать и обработать данные о ходьбе человека. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что получена достоверная информация об изменении положения в пространстве частей фигуры человека, связанных с положением акселерометров.

Особенностью конкретной сборки (устройства) является применение двух датчиков акселерометров, что позволяет проводить одновременный сравнительный анализ перемещения двух точек фигуры человека [15]. Для полноценного анализа нарушений в процессах ходьбы и опорно-двигательной системы человека необходимо провести масштабный сбор данных о ходьбе человека у больных и здоровых людей. Это позволит улучшить разработанное устройство, а дальнейшим расширением возможностей является пространственная модель, объединяющая результаты двух (или более) датчиков в виде скелетной модели.

Литература

1. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. – Иваново: Изд-во НППЦ «Стимул», 1996. – 344 с.
2. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. – М.: Наука, 1990. – 496 с.

3. Деревцова С.Н. Инструментальный метод исследования параметров ходьбы людей старших возрастных групп разных соматотипов // ВНМТ. – 2010. – № 2. – С. 181–185.

4. Винниченко Н.Т. Теория гироскопических приборов / Н.Т. Винниченко, Д.А. Кацай, А.А. Лысова. – Челябинск: ЮурГу, 2010. – 141 с.

5. Греченева А.В. Акселерометрический метод измерения суставных перемещений / А.В. Греченева, О.Р. Кузичкин, Н.В. Дорофеев // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 1. – С. 51–54.

6. Васильев К.К. Методы обработки сигналов. – Ульяновск, 2001. – 80 с.

7. Ижболдина В.В. Анализ траектории движения конечности на основе данных с микромеханических датчиков / В.В. Ижболдина, В.Ю. Будков, А.В. Денисов // Научный результат. Информационные технологии. – 2018. – Т. 3, № 4. – С. 48–61.

8. Кашуба В. Современные оптикоэлектронные методы измерения и анализа двигательных действий спортсменов высокой квалификации / В. Кашуба, И. Хмельницкая // Наука в олимпийском спорте. – 2005. – № 2. – С. 138–140.

9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

10. Катаев М.Ю. Методика учета угла направления движения человека при изучении параметров походки по видеопоследовательности / М.Ю. Катаев, Е.В. Рудова // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 109–113.

11. Катаев М.Ю. Численный метод и алгоритм определения центра тяжести движущегося человека из анализа потока изображений / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 201–205.

12. Clarke N.L. Authentication of users on mobile telephones. A survey of attitudes and practices / N.L. Clarke, S.M. Furnell // Comput. Secur. – 2005. – Vol. 24. – P. 519–527.

13. Sprager S. Inertial sensor-based gait recognition: A review / S. Sprager, M.B. Juric // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 22089–22127.

14. Pan G. Accelerometer-based gait recognition via voting by signature points / G. Pan, Y. Zhang, Z. Wu // Electron. Lett. – 2009. – Vol. 45. – P. 1116–1118.

15. Hoang T. Adaptive Cross-Device Gait Recognition Using a Mobile Accelerometer / T. Hoang, T.D. Nguyen, C. Luong, S. Do // J. Inf. Proc. Syst. – 2013. – Vol. 9. – P. 333–345.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Катаева Надежда Григорьевна

Д-р мед. наук, профессор каф. неврологии и нейрохирургии Сибирского государственного медицинского университета (СибГМУ)

Московский тракт, 2, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 90-11-01

Эл. почта: nadi51@yandex.ru

Чернов Руслан Андреевич

Студент каф. АСУ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: chernruslan@gmail.com

Kataev M.Yu., Kataeva N.G., Chernov R.A.

Assessment of Human Walking Parameters with Two Accelerometers

Movement is an integral part of a human activity. Maintaining human's health or doing sports, for example, requires an accurate assessment of a person's physical activity, and especially the way the person moves (gait). The natural age-related changes or diseases cause a disfunction of the musculoskeletal system, and limits human movement. Traditionally, the medical diagnostics consists in examination of a person in a static position or with a minimum level of movement. This article proposes a solution to the problem of assessing the parameters of a person's walking using several accelerometers fixed on the human body. This solution allows obtaining correct data on a human limb movement in time and space. The authors believe that this approach can be used to diagnose the state of the human musculoskeletal system.

Keywords: sensor, accelerometer, human gait, technique.**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-51-55*References*

1. Skvortsov D.V. [Clinical analysis of movements]. Ivanovo, Publishing house of SPC, Stimul, 1996, 344 p. (in Russ.).
2. Bernshtein N.A. [Physiology of movements and activity]. Moscow, Nauka, 1990. 496 p. (In Russ.).
3. Derevtsova S.N. An instrumental method for studying the walking parameters of people of older age groups of different somatotypes *VNMT*, 2010, no. 2, pp.181–185 (in Russ.).
4. Vinnichenko N.T., Katsai D.A. [Theory of gyroscopic devices]. Chelyabinsk, YuurGu, 2010, 141 p. (in Russ.).
5. Grecheneva A.V., Kuzichkin O.R., Dorofeev N.V. [Accelerometric method for measuring joint movements]. *Mechanical engineering and life safety*, 2015, no. 1, pp. 51–54 (in Russ.).
6. Vasiliev K.K. [Signal processing methods]. Ulyanovsk, 2001, 80 p. (in Russ.).
7. Izhboldina V.V., Budkov V.Yu., Denisov A.V. [Analysis of the trajectory of movement of the limb based on data from micromechanical sensors]. *Scientific result. Information Technology*, 2018, vol. 3, no. 4, pp.48–61 (in Russ.).
8. Kashuba V., Khmel'nitskaya I. [Modern optoelectronic methods for measuring and analyzing motor actions of highly

qualified athletes]. *Science in Olympic sport*, 2005, no. 2, pp. 138–140 (in Russ.).

9. Sergienko A.B. [Digital signal processing]. SPb., BHV-Petersburg, 2011, 768 p. (in Russ.).

10. Kataev M.Yu., Rudova E.V. [Methodology for taking into account the angle of direction of a person's movement when studying gait parameters by video sequence]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 109–113 (in Russ.).

11. Kataev M.Yu., Kataev S.G. Numerical method and algorithm for determining the center of gravity of a moving person from the analysis of the flow of images. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2 (24), part 3, pp. 201–205 (in Russ.).

12. Clarke N.L., Furnell S.M. Authentication of users on mobile telephones. A survey of attitudes and practices. *Comput. Secur.*, 2005, vol. 24, pp. 519–527

13. Sprager S., Juric M.B. Inertial sensor-based gait recognition: A review. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 22089–22127.

14. Pan G., Zhang Y., Wu Z. Accelerometer-based gait recognition via voting by signature points. *Electron. Lett.*, 2009, vol. 45, pp. 1116–1118.

15. Hoang T., Nguyen T.D., Luong C., Do S. Adaptive Cross-Device Gait Recognition Using a Mobile Accelerometer. *J. Inf. Proc. Syst.* 2013, vol. 9, pp. 333–345.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Automated Control Systems (ACS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Nadezhda G. Kataeva

Doctor of Science in Medicine, Professor, Department of Neurology and Neurosurgery, Siberian State Medical University 2, Moscovsky tract, Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-11-01
Email: nadi51@yandex.ru

Ruslan A. Chernov

Student, Department of Automated Control Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: chernruslan@gmail.com