

# Анализ структуры шага при движении по лестнице по сигналам линейных ускорений

В. С. Коновалова, П. Г. Королев, В. Мамыкова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail pgkorolev@gmail.com

**Аннотация.** Восстановление техники ходьбы является показателем результативности лечения человека как после травм органов опоры, так и при заболеваниях нейрофизиологического профиля. Одним из показателей результативности реабилитации является способность пациента перемещаться по лестнице вверх и вниз без опоры. Органолептический контроль позволяет сформировать субъективные оценки. Для получения объективной информации с известной погрешностью применяются измерительные системы линейных и угловых перемещений. Доклад посвящен исследованию фазовой структуры шага с помощью обработки линейных ускорений нижних конечностей при движении по лестнице.

**Ключевые слова:** акселерометр; информативный параметр; реабилитация; фазовая структура шага

## I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В процессе производственной деятельности, занятий спортом, в быту, возникают травмы органов опоры. Как правило, медики, контролирующие процесс реабилитации, оценивают ее результативность с применением органолептического контроля (шкала Тинетти и пр.). Данный способ носит субъективный характер, определить погрешность оценивания в данном случае не представляется возможным, что приводит к необходимости применения информационно-измерительных систем для инструментального контроля параметров движения конечностей человека. Структурные решения, применяемые в таких системах, описаны в [1, 2], сигналы, характеризующие движение человека по горизонтальной поверхности, проанализированы в [3, 4]. Ходьба по лестнице применяется для оценивания результативности лечения в различных клинических областях.

Результаты измерений получены с помощью измерительных каналов (ИК), включающих в себя аналоговые акселерометры и четырнадцатиразрядный АЦП (рис. 1).

Приведенная статическая погрешность ИК оценена в 4 %. Частота дискретизации составляла 1 кГц, что выше минимально допустимой, оцененной в [6]. Присутствует шумовая составляющая с частотой порядка 500 Гц и амплитудой 0,01 В.



Рис. 1. Структура измерительной системы

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБРАБОТКА

Авторами накоплен массив результатов измерения линейных ускорений от измерительных преобразователей, расположенных на каблуках обуви при движении по лестнице вверх и вниз, как условно здоровых людей, так и проходящих реабилитацию после травмы органов опоры. Частота дискретизации составила 1 кГц, объем выборки – 10000 отсчетов, этого достаточно, чтобы записать 7–8 двойных шагов каждой ноги. Данное ограничение, в отличие от движения испытуемого по горизонтальной поверхности, накладывается, в основном длиной лестничного марша и неизбежным утомлением. Сигналы, характеризующие ускорение по вертикальной оси при движении по лестнице вверх у условно здорового человека представлены на рис. 2 и 3, и пациента, проходящего лечение после травмы голеностопного сустава, на рис. 4 и 5.

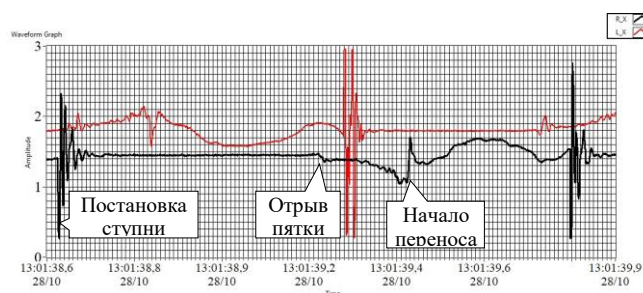


Рис. 2. График ускорения по вертикальной оси условно здорового человека (двойной шаг правой ноги при движении по лестнице вверх)

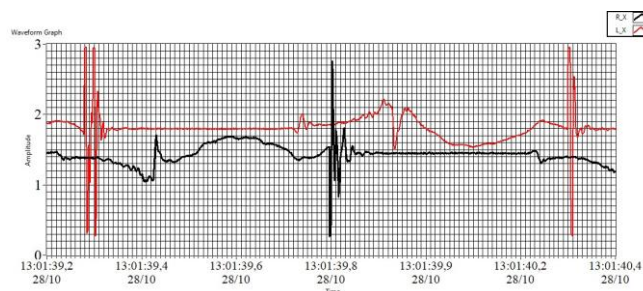


Рис. 3. График ускорения по вертикальной оси условно здорового человека (двойной шаг левой ноги при движении по лестнице вверх)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФН, проект № 22-29--20123 (50% вклада), и Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 14.04.2022 № 14/2022 (50% вклада)

Видно, что подъем пятки начинается до постановки разноименной ноги.

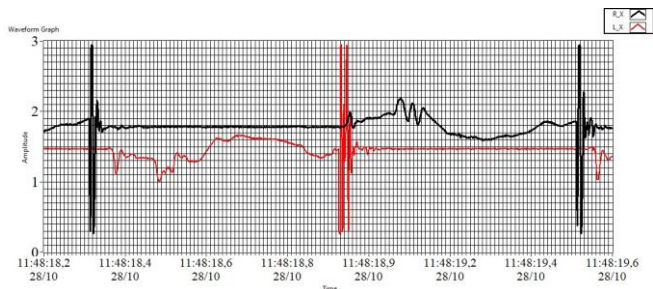


Рис. 4. График ускорения по вертикальной оси пациента после травмы органов опоры (двойной шаг правой ноги при движении по лестнице вверх)

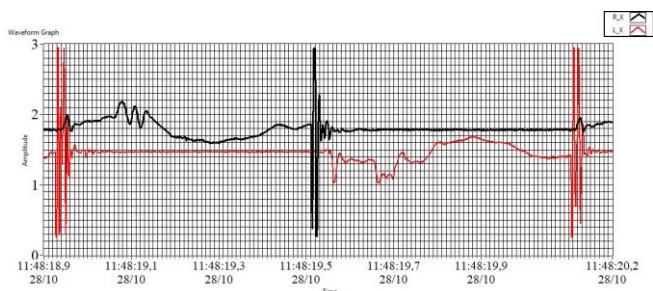


Рис. 5. График ускорения по вертикальной оси пациента после травмы органов опоры (двойной шаг левой ноги при движении по лестнице вверх)

Подъем пятки начинается не ранее постановки разноименной ноги, причем при шаге травмированной правой ногой сначала выполняется уверенная опора, и только после этого – подъем разноименной ноги.

Введем следующие обозначения: ДШ – двойной шаг; ФО – фаза опоры; ПП – подъем пятки; ФП – фаза переноса; интервал ОП-ПП – интервал между моментом начала отрыва пятки и моментом постановки пятки разноименной ноги.

ТАБЛИЦА I. ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ШАГА ПРАВОЙ НОГИ ПРИ ПОДЪЕМЕ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Параметр	По лестнице вверх	
	Условно здоровый	После травмы
Средняя продолжительность ДШ, с.	1,008	1,190
Разброс продолжительности ДШ, с.	0,220	0,075
Средняя продолжительность ФО, с.	0,718	0,853
Разброс продолжительности ФО, с.	0,100	0,079
Средняя продолжительность ПП, с.	0,352	0,245
Разброс продолжительности ПП, с.	0,260	0,075
Средняя продолжительность ФП, с.	0,290	0,339
Разброс продолжительности ФП, с.	0,260	0,075
Средний интервал ОП-ПП	-0,028	0,022
Разброс интервала ОП-ПП	0,085	0,065
Соотношение ФО/ДШ, %	71,23	71,68

Выявить значимые расхождения малых выборок продолжительности двойного шага, фазы опоры, фазы переноса не удалось. Сравнение выборок проводилось с помощью критерия Манна и Уитни [6, 7, 8], пример отсчетов с незначимым расхождением выборок приведен на рис. 6. Тем не менее, время опоры на две ноги при двойном шаге правой, значительно отличается у здорового человека и пациента на стадии реабилитации (рис. 7). Данный результат подтверждает отличие, обнаруженное визуально на графике ускорения по вертикальной оси

для правой, травмированной ноги, приведенного на рис. 5. При анализе данного параметра для левой ноги расхождение незначимо. Также, данный вывод подтверждается значениями параметра «Средний интервал ОП-ПП» в таблице 1 (третья строчка снизу), для здорового человека значение параметра отрицательно, для находящегося на стадии лечения – положительно.



Рис. 6. Сравнение выборок соотношений фазы опоры к продолжительности двойного шага после травмы и в состоянии «условно здоров»

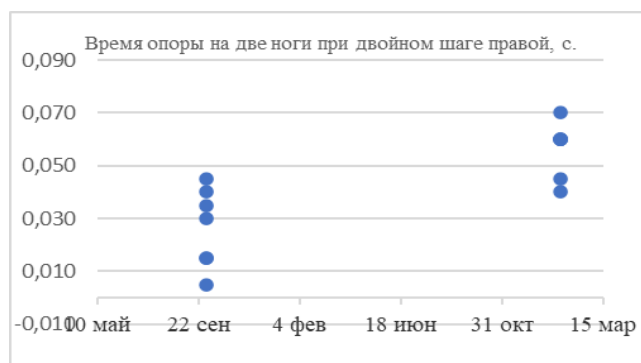


Рис. 7. Сравнение выборок продолжительности опоры на две ноги при двойном шаге правой, после травмы и в состоянии «условно здоров»

ТАБЛИЦА II. ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ШАГА ЛЕВОЙ НОГИ ПРИ ПОДЪЕМЕ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Параметр	По лестнице вверх	
	Условно здоровый	После травмы
Средняя продолжительность ДШ, с.	0,983	1,199
Разброс продолжительности ДШ, с.	0,060	0,160
Средняя продолжительность ФО, с.	0,651	0,870
Разброс продолжительности ФО, с.	0,040	0,070
Средняя продолжительность ПП, с.	0,201	0,810
Разброс продолжительности ПП, с.	0,100	0,090
Средняя продолжительность ФП, с.	0,331	0,323
Разброс продолжительности ФП, с.	0,040	0,050
Средний интервал ОП-ПП	-0,016	-0,020
Разброс интервала ОП-ПП	0,035	0,100
Соотношение ФО/ДШ, %	66,22	72,56

Результаты обработки параметров двойного шага при движении по лестнице вверх представлены в табл. 1 и 2. При движении по лестнице вниз, графики ускорений имеют отличия, заключающиеся в том, что сначала человек опирается на ступню и только потом опускает пятку. Данные различия видны на графиках ускорений, приведенных на рис. 8 и 9.



Рис. 8. График ускорения по вертикальной оси пациента после травмы органов опоры (двойной шаг правой ноги при движении по лестнице вниз)

На рис. 8 видно, что подъем пятки правой, травмированной ноги, начинается до постановки ступни левой.



Рис. 9. График ускорения по вертикальной оси пациента после травмы органов опоры (двойной шаг левой ноги при движении по лестнице вниз)

На рис. 9 видно, что подъем пятки левой, здоровой ноги, начинается после постановки ступни травмированной.

ТАБЛИЦА III. ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ШАГА ПРАВОЙ НОГИ ПРИ СПУСКЕ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Параметр	По лестнице вниз	
	Условно здоровый	После травмы
Средняя продолжительность ДШ, с.	1,020	1,133
Разброс продолжительности ДШ, с.	0,040	0,075
Средняя продолжительность ФО, с.	0,559	0,626
Разброс продолжительности ФО, с.	0,030	0,015
Средняя продолжительность ПП, с.	0,178	0,172
Разброс продолжительности ПП, с.	0,040	0,070
Средняя продолжительность ФП, с.	0,463	0,507
Разброс продолжительности ФП, с.	0,040	0,050
Средний интервал ОП-ПП	-0,123	-0,148
Разброс интервала ОП-ПП	0,050	0,050
Соотношение ФО/ДШ, %	54,80	55,25

ТАБЛИЦА IV. ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ШАГА ЛЕВОЙ НОГИ ПРИ СПУСКЕ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Параметр	По лестнице вниз	
	Условно здоровый	После травмы
Средняя продолжительность ДШ, с.	1,022	1,113
Разброс продолжительности ДШ, с.	0,100	0,045
Средняя продолжительность ФО, с.	0,591	0,626
Разброс продолжительности ФО, с.	0,040	0,025
Средняя продолжительность ПП, с.	0,168	0,147
Разброс продолжительности ПП, с.	0,020	0,040
Средняя продолжительность ФП, с.	0,428	0,488
Разброс продолжительности ФП, с.	0,030	0,035
Средний интервал ОП-ПП	-0,100	-0,057
Разброс интервала ОП-ПП	0,050	0,070
Соотношение ФО/ДШ, %	57,83	56,24



Рис. 10. Сравнение выборок продолжительности опоры на две ноги при двойном шаге правой, после травмы и в состоянии «условно здоров»

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ результатов измерений сигналов линейных ускорений, характеризующих движения нижних конечностей человека при движении по лестнице вверх и вниз. Обработаны результаты 12 информативных параметров, выявлены информативные параметры сигналов, позволяющие оценивать результативность реабилитации после травм опорно-двигательного аппарата.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность доценту кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Царевой А.В., канд. техн. наук, за оказанную помощь при проведении данного исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Арешко Е.О., Заболотская Н.К., Королев П.Г. Системы исследования кинематики движений. Структурные решения // 2017 XX IEEE Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017), с. 593-595.
- [2] Tsareva Anna V., Mikus Oleg A., Kuk Sergei A. Systems design for movement kinematics research. determination of parameters for describing linear movements of the lower limbs // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018-January. P. 1008-1010.
- [3] Movement kinematics research systems. Analysis of linear accelerations signals / Alekseev V.V., Zhurbilo P.G., Korolev P.G., Minchev N.V. // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018-January. P. 857-860.
- [4] Movement kinematics research systems. The measuring experiment organization / Korolev P.G., Romantsova N.V., Galimullina E.E., Akolzin A.I. // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 8656718, с. 553-555.
- [5] Оценка эффективности системы контроля кинематики движений у пациентов нейрохирургического профиля с функциональными нарушениями опорно-двигательного аппарата / Царева А.В., Соколова Ф.М., Королев П.Г., Иванова Н.Е., Алексеев В.В. // СТМ. 2019. Т.11, №3, с. 82-88.
- [6] Лемешко Б.Ю., Помадин С.С. Проверка гипотез о математических ожиданиях и дисперсиях в задачах метрологии и контроля качества при вероятностных законах, отличающихся от нормального // Метрология, 2004, no. 3, с. 3-15.
- [7] Закс Л. Статистическое оценивание. Москва. Статистика, 1976. 598 с.
- [8] Оценка дефектов железнодорожного полотна. Исследование критерия / П.Г. Королев, В.А. Костыря, С.А. Кук, О.А. Микус // Сб. докл. конференции по мягким вычислениям и измерениям, SCM 2018. С. 85-88.