

УДК 615.47



Т.В. Жемчужкина<sup>1</sup>, Т.В. Носова<sup>1</sup>, Я.В. Носова<sup>1</sup>, А.В. Губанов<sup>1</sup>,  
Д.Р. Дуплий<sup>2</sup>, И.В. Котульский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
г. Харьков, Украина, nuav007@gmail.com;

<sup>2</sup>ГУ «Института патологии позвоночника и суставов им. проф. М.И. Ситенко НАМН Украины»,  
г. Харьков, Украина, duplijd@gmail.com

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМГ-СИГНАЛА С ЦЕЛЬЮ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ПОЯСНИЧНЫХ БОЛЕЙ

В данной статье исследуется зависимость набора спектральных показателей ЭМГ-сигнала от пола и диагноза в связанных и несвязанных выборках непараметрическими методами математической статистики. Работа проводилась на основе результатов обследования в четырех группах пациентов: практически здоровые без жалоб; условно здоровые с жалобами на боли в спине; вертебрологические пациенты; пациенты, страдающие сколиозом.

БОЛИ ПОЯСНИЧНЫЕ, КРИТЕРИЙ МАННА-УИТНИ, КРИТЕРИЙ УИЛКОКСОНА, МЫШЦЫ, СПЕКТР, СТАТИСТИКА, УТОМЛЯЕМОСТЬ, ЧАСТОТА МЕДИАННАЯ, ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЯ

### Введение

Боль в поясничном отделе позвоночника (БПОП) является мультифакториальным страданием, чрезвычайно распространенным среди населения. Согласно социальным опросам, примерно 80% всего взрослого населения хотя бы один раз в жизни испытывали БПОП. Среди ведущих нарушений здоровья боль в спине является второй по частоте причиной пропусков работы и снижения трудоспособности в США (2002).

Диагностика и лечение поясничной боли являются крайне сложной задачей, так как у большинства пациентов отсутствует достаточное количество органических признаков заболевания, выявляемых при рентгенографии магнитно-резонансной томографии позвоночника. В результате, более чем у 85% людей, страдающих поясничными болями, не удается выявить структурную патологию и таким пациентам зачастую ставят диагноз «периодические или хронические боли в нижней части спины» (low back pain). Некоторые авторы предполагают, что у многих из этих людей имеются изначальные скелетно-мышечные нарушения, что, в свою очередь, предрасполагает к появлению БПОП.

Клинические исследования (1989) таких пациентов показали, что болям в спине сопутствует еще хотя бы одно ярко выраженное нарушение опорно-двигательного аппарата. Так же авторами выявлены локализованные точки болезненности спины, ограничение двигательной активности спины и шеи, преходящие нарушения чувствительности, ригидность отдельных мышц, снижение объема движений бедер, изменения походки и прочие функциональные нарушения, которые не относятся к неврологической симптоматике [1]. В этом свете электромиография представляется перспективным методом исследования, поскольку позволяет регистрировать различные функциональные состояния мышцы.

Биоэлектрическая активность мышцы в состоянии изометрического напряжения представлена электромагнитными колебаниями функционирующих в ней двигательных единиц. Запись поверхностной (глобальной, интерференционной) электромиограммы (ЭМГ) представляет собой суммарную разность биоэлектрических потенциалов всех мышечных волокон, расположенных в проекции кожного электрода. Величина потенциала, генерируемого отдельным мышечным волокном обусловлена его диаметром, а суммарная мышечная активность зависит от количества вовлеченных двигательных единиц, синхронности их активации. В начале сокращения амплитуда может несколько увеличиваться вместе с вовлечением и синхронизацией максимального количества двигательных единиц, затем, по мере развития утомления, амплитуда постепенно снижается. Таким образом, частота и амплитуда сигнала изменяются в зависимости от степени напряжения мышцы [2]. Если полученную сложную интерференционную кривую разложить с помощью преобразований Фурье, возможно распознать преобладающие гармоники двигательных единиц конкретной мышцы. Поэтому актуальной является проблема получения информативных показателей электромиографического сигнала, характеризующих состояние мышечной системы в норме и при развитии патологии.

### 1. Цель и постановка задачи

На основе данных поверхностной электромиографии проанализировать отличия между группами практически здоровых добровольцев, не предъявляющих никаких жалоб (здоровых), добровольцев, страдающих периодическими болями в спине без выявленной органической патологии (условно здоровые) и пациентами, имеющими дегенеративные заболевания позвоночника (пациенты вертебрологической клиники ИППИС им. М.И. Ситенко).

Задачами исследования являются:

- рассчитать спектральные характеристики электромиографических сигналов мышц спины, полученных в указанных группах;
- проанализировать вероятность различий спектральных характеристик исследуемых групп относительно полового признака;
- проанализировать вероятность различий спектральных характеристик ЭМГ-сигнала между группами здоровых, условно здоровых и группой пациентов пациенты вертебрологической клиники;
- проанализировать спектральные характеристики ЭМГ-сигнала, характеризующие утомляемость мышц спины во время электромиографического исследования в зависимости от наличия или отсутствия вертебрологической патологии.

## 2. Выбор спектральных характеристик и статистических методов

Исследования проводились в рамках сотрудничества между кафедрой биомедицинской инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники и лабораторией патофизиологии Института патологии позвоночника и суставов им. М.И. Ситенко АМН Украины. Для выполнения поставленных задач было обследовано 93 человека. При регистрации электромиограммы поверхностные электроды размещали на разгибателе туловища (*m. Erector Spinae*) на 2-3 см вправо и влево от срединной линии спины, на уровне пятого поясничного позвонка (L5) тела человека (рис. 1). Зарегистрированный сигнал с мышц усиливался и проходил предварительную фильтрацию непосредственно в 4-канальном компьютерном электромиографе Нейро-ЭМГ (Нейрософт), после чего передавался для дальнейшей обработки и анализа в персональный компьютер.

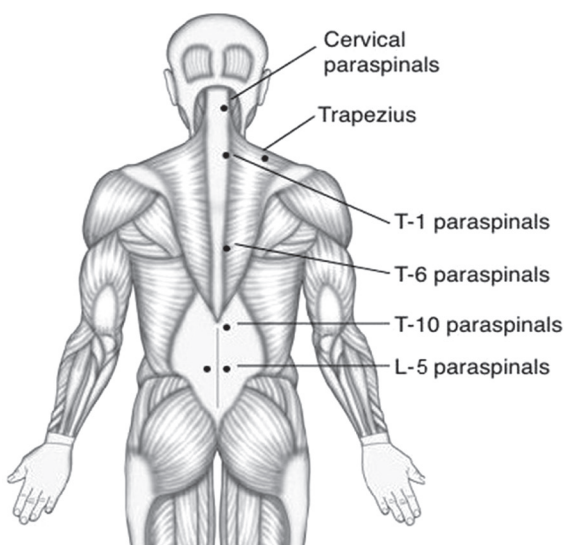


Рис. 1. Мышцы спины человека

Исходный сигнал поверхностной ЭМГ представлен в виде звукового файла в формате WAVE с частотой дискретизации 20 кГц.

Существуют две основные группы параметров для оценки ЭМГ – параметры, рассчитанные во временной и частотной областях. В данной работе исследовались частотные параметры ЭМГ-сигнала. Выбор количественных спектральных характеристик для расчета основан на работах [3-5].

В частотной области основными параметрами являются медианная частота и средняя частота.

Медианная частота определяется как частота (1), делящая спектральную плотность мощности (СПМ) на две равные части. Вычисляется по формуле:

$$\int_0^{MedF} P(f)df = \int_{MedF}^{\infty} P(f)df = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P(f)df, \quad (1)$$

где *MedF* – медианная частота, Гц; *P* – спектральная плотность мощности; *f* – частота.

Средняя частота – частота, на которой СПМ принимает среднее значение (2), вычисляется по формуле:

$$MeanF = \frac{\int_0^{\infty} f \cdot P(f)df}{\int_0^{\infty} P(f)df}, \quad (2)$$

где *MeanF* – средняя частота, Гц.

Также определялись:

- пиковая частота (*PeakF*) – частота, на которой СПМ принимает максимальное значение, Гц;
- средняя мощность (*MeanP*) – частота, на которой СПМ принимает среднее значение, В<sup>2</sup>/Гц;
- общая мощность (*TotalP*) – суммарная СПМ на всех частотах, В<sup>2</sup>/Гц.

Для анализа динамики медианной частоты, которая используется для в качестве характеристики усталости мышц (в норме медианная частота в процессе физической нагрузки снижается), запись сигнала поверхностной электромиограммы разделяется на интервалы по 1 секунде, перекрывающиеся на 50%. Для каждого односекундного интервала вычисляется СПМ и медианная частота. В качестве анализируемых параметров для оценки динамики медианной частоты будем использовать медианную частоту в начале исследуемого интервала времени (*dMedFfirst*) и медианную частоту в конце исследуемого интервала времени (*dMedFend*), а также скорость изменения медианной частоты (тангенс угла наклона регрессионной прямой, аппроксимирующей значения медианных частот для односекундных интервалов) – *frate*.

Анализ спектральных показателей ЭМГ-сигнала в зависимости от пола проводили в четырех группах:

- А1 – практически здоровые добровольцы без жалоб (20 женщин; 8 мужчин);
- А2 – условно здоровые с жалобами на боль в спине (10 женщин; 8 мужчин);
- А3 – вертебрологические пациенты (25 женщин; 16 мужчин);

– А4 – пациенты, страдающие сколиозом (5 женщин; 2 мужчины).

Анализ спектральных показателей ЭМГ-сигнала без учета пола проводили в четырех группах обследуемых, а именно:

- Б1 – практически здоровые добровольцы без жалоб (32 миограммы);
- Б2 – условно здоровые с жалобами на боль в спине (38 миограмм);
- Б3 – вертебрологические пациенты (72 миограммы);
- Б4 – пациенты, страдающие сколиозом (19 миограмм).

Для определения различий между выбранными параметрами ЭМГ-сигнала и полом обследуемого был выбран непараметрический критерий U (Манна-Уитни). Критерий U (Манна-Уитни) в математической статистике позволяет оценивать различия двух выборок. Они могут быть даны по уровню некоего признака, который измерен количественно. Этот метод идеален для оценки различий малых выборок [6]. U-критерий Манна-Уитни является непараметрическим критерием, поэтому, в отличие от t-критерия Стьюдента, не требует наличия нормального распределения сравниваемых совокупностей. U-критерий подходит для сравнения малых выборок: в каждой из выборок должно быть не менее 3 значений признака. Допускается, чтобы в одной выборке было 2 значения, но во второй тогда должно быть не менее пяти. Метод основан на определении того, достаточно ли мала зона перекрещивающихся значений между двумя вариационными рядами (ранжированным рядом значений параметра в первой выборке и таким же во второй выборке). Чем меньше значение критерия, тем вероятнее, что различия между значениями параметра в выборках достоверны [7].

Для оценки динамики медианной частоты был выбран непараметрический критерий Уилкоксона. Анализировались два массива медианных частот, измеренных в начале исследуемого интервала времени (dMedFfirst) и в конце исследуемого интервала времени (dMedFend) в четырех группах Б1-Б4.

T-критерий Уилкоксона применяется для сопоставления показателей, измеренных в двух разных условиях на одной и той же выборке испытуемых, т.е. используется для статистической оценки двух связанных выборок. Он позволяет установить не только направленность изменений, но и их выраженность. Суть метода состоит в сопоставлении выраженности сдвигов в том и ином направлениях по абсолютной величине. Для этого сначала ранжируются все абсолютные величины сдвигов, а потом суммируются ранги. Если сдвиги в положительную и в отрицательную сторону происходят случайно, то суммы рангов абсолютных значений их будут примерно равны. Если же интенсивность сдвига в одном из направлений перевешивает, то сумма рангов абсолютных значений сдвигов в противополо-

жную сторону будет значительно ниже, чем это могло бы быть при случайных изменениях [8].

### 3. Статистический анализ спектральных характеристик электромиограмм

Для расчета спектральных параметров ЭМГ-сигнала был разработан программный модуль на языке MatLab, который позволяет вырезать неинформативные участки интерференционной кривой, рассчитать спектральные характеристики сигнала (рис.2) [9]. Результаты работы модуля с информацией о пациенте в автоматическом режиме сохраняются в базу данных для последующей статистической обработки анализируемых выборок.

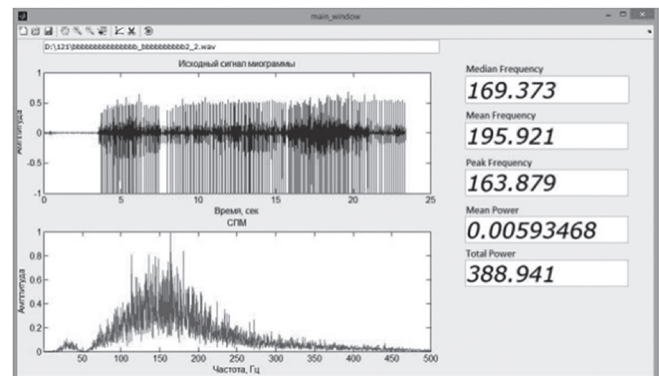


Рис. 2. Основное окно программного модуля спектрального анализа ЭМГ сигнала

После получения спектральных характеристик электромиограмм были сформированы выборки для статистической обработки и выявления статистически значимых связей между группой, к которой относится пациент и каждой спектральной характеристикой, а также половым признаком. Расчеты проводились с помощью пакета SPSS Statistics 17.0.

Проведенные расчеты вероятности различия между спектральными параметрами ЭМГ-сигнала и полом пациента для группы А1, А2, А3, А4 показали, что разница спектральных показателей ЭМГ-сигналов между женщинами и мужчинами не является статистически значимой для всех исследуемых показателей ( $p > 0,001$ ) во всех группах.

Что позволяет проводить дальнейший анализ миограмм, не учитывая половой принадлежности обследуемого.

При определении различий среди выбранных параметров ЭМГ-сигнала между пациентами без патологий и с патологиями нервно-мышечного аппарата, получили следующие результаты:

- в группах Б1+Б4, Б1+Б2, Б3+Б2 разница показателей ЭМГ-сигнала между группами не является статистически значимой ( $p > 0,001$ );
- в группах Б2+Б4 разница показателей ЭМГ-сигнала между группами не является статистически значимой ( $p > 0,001$ ), кроме параметров MedF, MeanF ( $p < 0,001$ );

– в группах Б3+Б4 разница показателей ЭМГ-сигнала между группами не является статистически значимой ( $p > 0,001$ ), кроме параметра MedF ( $p < 0,001$ );

– в группах Б1+Б3 разница показателей ЭМГ-сигнала между группами не является статистически значимой ( $p > 0,001$ ), кроме параметров TotalP, frate ( $p < 0,001$ ).

Для анализа утомляемости мышц обследуемых оцениваем динамику медианной частоты. Значение медианной частоты в начале исследуемого интервала времени (dMedFfirst) и медианную частоту в конце исследуемого интервала времени (dMedFend) сравниваем с помощью непараметрического критерия Уилкоксона.

Численное значение вероятности ошибки ( $p > 0,001$ ) в группах Б3, Б4 свидетельствует об очень незначимой разнице, а в группах Б1, Б2 – ( $p < 0,001$ ) очень значимая разница между медианной частотой, измеренной в начале исследуемого интервала времени и в конце исследуемого интервала времени.

### Выводы

Спектральные параметры ЭМГ мужчин и женщин ни в группах пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника, ни в группах практически и условно здоровых добровольцев статистически достоверно не различаются.

Группы здоровые с болью и обследуемые со сколиозом различаются по параметрам медианной и средней частоты. Группы пациентов, страдающих вертебрологическими заболеваниями и сколиозом, различаются по параметру медианной частоты. Группы здоровые и страдающие вертебрологическими заболеваниями различаются параметрами общей мощности и скорости изменения медианной частоты.

У обследуемых в группах с патологиями (Б3, Б4) не наблюдается существенного изменения медианной частоты во время физической нагрузки, которая свидетельствует о мышечном утомлении, а в контрольной группе и группе здоровых обследуемых с болями в спине (Б1, Б2) – пациенты испытывают утомляемость мышц. При анализе средних значений начальной и конечной медианных частот в различных группах было замечено, что у пациентов с вертебрологическими заболеваниями начальная медианная частота находится на уровне конечной медианной частоты в контрольной группе, и практически не изменяется с течением времени в процессе физической нагрузки. В группе пациентов со сколиозом начальная медианная частота находится на уровне начальной медианной частоты здоровых с болями и практически не изменяется во времени. У здоровых с болями начальная медианная частота ниже таковой в контрольной группе, в процессе физической нагрузки наблюдается ее существенное снижение.

Перспективой работы является дальнейший статистический анализ данных электромиографического исследования по возрастным категориям, а также построение моделей для классификации пациентов по значениям спектральных характеристик данных поверхностной электромиографии

**Список литературы:** 1. Michael E. Geisse, [Text] Surface Electromyography and Low Back Pain // SPECIAL ISSUE Biofeedback Volume 35, Issue 1, pp. 13-16. 2. Скиданов А. Г., Спектральный анализ электромиограмм мышц спины при дегенеративных заболеваниях позвоночника (обзор литературы) [Текст] / А.Г. Скиданов, Д.Р. Дуплий, В.А. Колесниченко, В.А. Радченко ISSN 0030-5987. Ортопедия, травматология и протезирование. – 2015. – № 1 – С. 98-105. 3. Antoni V.F. Nargol, Anthony P.C. Jones, Peter J. Kelly, Charles G.Greenough Factors in the Reproducibility of Electromyographic Power Spectrum Analysis of Lumbar Paraspinal Muscle Fatigue // SPINE – 1999.- Volume 24 - Issue 9, pp. 883-888. 4. Chia-Chun Hug, Tsu-Wang Shen, Chung-Chao Liang, Wen-Tien Wu [Text] Using Surface Electromyography (SEMG) to Classify Low Back Pain Based on Lifting Capacity Evaluation with Principal Component Analysis Neural Network Method // IEEE. – 2014. – P. 18-21. 5. EMG Frequency Signal Analysis [Электронный ресурс] Biopac systems, Inc., 2010. URL: <http://www.biopac.com/emg-electromyogram-frequency-signal-analysis>. 6. Kriterij Manna-Utni [Электронный ресурс], fb.ru, 2014. URL: <http://fb.ru/article/141592/kriteriy-manna-uitni-primer-tablitsa>. 7. U-критерий Манна-Уитни [Электронный ресурс] Медицинская статистика - 2013. URL: <http://medstatistic.ru/theory/mann.html>. 8. Л. С. Туткова. Математические методы в психологии // Издательство Дальневосточного университета: ВЛАДИВОСТОК. – 2002. – 142 с. 9. Губанов О.В., Жемчужкина Т.В., Носова Т.В., Носова Я.В. Модуль обработки электромиографических данных // 5-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2014), конференція «Проблеми біомедіцинженерії. Наука і технології». – Харків. – 2014. – Том 3, С.25-27.

Поступила в редколлегию 25.05.2015

УДК 615.47

**Статистичний аналіз спектральних характеристик ЕМГ-сигналу з ціллю диференціювання поперекових болей** / Т.В. Жемчужкіна, Т.В. Носова, Я.В. Носова, О.В. Губанов, Д.Р. Дуплій, І.В. Котульський // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2015. – № 2 (85). – С. 105–108.

Досліджується залежність спектральних показників ЕМГ-сигналу в залежності від статі та діагнозу у пов'язаних та незалежних вибірках методами математичної статистики.

Лл. 02. Бібліогр. : 09 найм.

UDC 615.47

**Statistical analysis of the spectral characteristics of the EMG signal for the purpose of differentiation of lumbar pain** / T.V. Zhemchuzhkina, T.V. Nosova, Y.V. Nosova, A.V. Gubanov, D.R. Duplij, I.V. Kotulskij // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2015. – № 2 (85). – P. 105–108.

Is researched dependence of spectral parameters of the EMG signal from the floor and in the diagnosis and non samples, methods of mathematical statistics.

Fig. 02. Ref.: 09 items.