

УДК 577.353; 612.741.1; 616.71

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМИОГРАММ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРАЦИИ

А.Н. Осипов, В.М. Бондарик, Д.Ф. Кузнецов, Е.П. Остроух, Х. Масудян

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

THE DEPENDENCE OF ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTROMYOGRAMS ON THE PARAMETERS OF REGISTRATION

A.N. Osipov, V.M. Bondarik, D.F. Kuznecov, E.P. Ostroukh, X. Masudian

Byelorussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Предложены критерии, позволяющие учесть энергетические параметры нестационарного биоэлектрического сигнала и эффективно проанализировать ЭМГ-сигнал. Представлены экспериментальные данные зависимости средней амплитуды и энергии ЭМГ-сигналов от времени. Установлено, что изменение межэлектродного расстояния оказывает влияние на зарегистрированный ЭМГ-сигнал. При этом не выявлена зависимость параметров суммарной электромиограммы мышцы *m. gastrocnemius medialis* от площади электродов.

Ключевые слова: электромиография, поверхностные электроды, амплитуда электромиограммы, энергия электромиограммы.

In the paper the authors propose criteria that take into account the energy parameters of a nonstationary bioelectric signal, and thereby quickly and efficiently analyze the EMG signal. Experimental data of the dependence of the average EMG amplitude and the energy signals on time are presented. It is established that changing of the inter-electrode distance affects the Registered EMG signal. The dependence of the parameters of the total muscle electromyogram of *m. gastrocnemius medialis* of the area of the electrodes is not revealed.

Keywords: *electromyography, surface electrodes, EMG amplitude, EMG energy.*

Введение

Суммарная электромиография, основанная на регистрации анализа суммарной биоэлектрической активности совокупности двигательных единиц с помощью накожных электродов широко используется для исследования нервно-мышечной системы [1], [2].

Традиционные методы анализа суммарной электромиограммы (ЭМГ) базируются на расчете статистических параметров (средняя арифметическая амплитуда и частота импульсов) и визуальной оценке по общему виду ЭМГ в соответствии с классификацией Ю.С. Юсевич. Внедрение информационных технологий в медицину послужило основанием для появления новых методов обработки и анализа электромиограммы, и как результат – расширения возможностей электромиографии в клинической электрофизиологии. В настоящее время в функциональной диагностике все более широко применяются различные методы обработки ЭМГ сигналов: линейного и нелинейного анализа, метода частотно-временного преобразования, спектральных методов и др. [3]–[6]. Однако следует отметить, что в литературе отсутствуют сравнительные результаты исследований поверхностных электромиограмм (ЭМГ) сигналов, полученных при различных параметрах регистрации. Поэтому

целью данной работы стало изучение влияния параметров электродов (диаметра, расстояния между электродами) на энергетические характеристики ЭМГ сигнала.

1 Материал и методика исследований

Для регистрации биоэлектрической активности использовался аппаратно-программный комплекс, который позволяет выполнить расчет ее основных энергетических характеристик (рисунок 1.1).

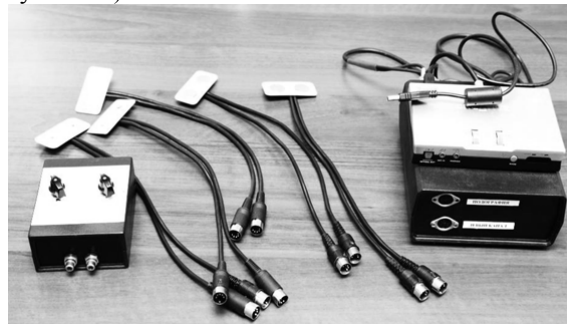


Рисунок 1.1 – Аппаратно-программный комплекс анализа поверхностных электромиограмм

Комплекс включал в себя блок электродов, блок усилителя, модуль ввода-вывода аналоговых сигналов, компьютер со специальным программным обеспечением. Используемое программное

обеспечение, позволяло обрабатывать ЭМГ в режиме реального времени, рассчитывать параметры и значения средних амплитуд и мощности сигнала [7].

В исследовании приняли участие в качестве испытуемых 11 мужчин (в возрасте от 19 до 21 года). Исследования проводились в области задней поверхности голени (проекция икроножной мышцы *m. gastrocnemius medialis*) по приведенной ниже методике. Для проведения исследования зависимости параметров ЭМГ-сигнала от межэлектродного расстояния использовались электроды, соответствующие принятым нормативно-техническим документам [8]–[10]. В используемой системе электродов межэлектродное расстояние варьировалось от 5 до 30 мм (рисунок 1.2, а).

При исследовании зависимости параметров ЭМГ-сигнала от площади электродов на голень испытуемого на расстоянии 30 мм друг от друга накладывались два электрода, диаметр которых варьировался от 3 до 19 мм (рисунок 1.2, б). Электроды располагались вертикально вдоль двигательных единиц исследуемой мышцы и фиксировались жгутами.

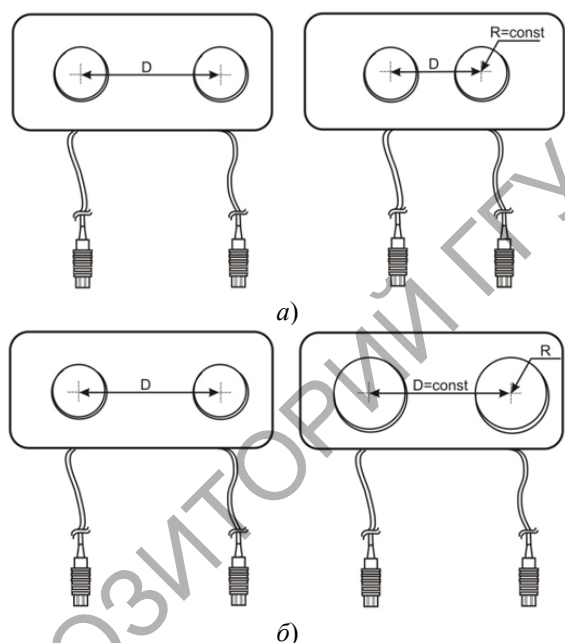


Рисунок 1.2 – Электроды, примененные в исследованиях влияния межэлектродного расстояния (а), площади электродов (б)

Биоэлектрическая активность мышцы *m. gastrocnemius medialis* регистрировалась при ее максимальном произвольном concentрическом напряжении. Тестовое движение выполнялось по следующему алгоритму:

- 1) сокращение мышцы за $1,5 \pm 0,5$ с;
- 2) удержание мышцы в состоянии максимального сокращения в течение $4,0 \pm 0,5$ с;
- 3) расслабление мышцы за $1,5 \pm 0,5$ с.

Экспериментальные данные сохранялись в электронной базе данных. Далее производился анализ результатов, поиск закономерностей между энергетическими характеристиками сигналов и параметрами электродов.

С целью проведения корректного анализа данных регистрация электромиограмм у участников исследования проводилась в виде серий измерений. Кратность повторения измерений рассчитывалась по формуле:

$$n = \left(u_k \cdot \frac{\sigma_{\Delta}}{\varepsilon} \right)^2, \quad (1.1)$$

где u_k – квантиль нормированного нормального распределения (определяется по таблице), σ_{Δ} – оценка стандартного отклонения, ε – абсолютная точность интервальной оценки. Для определения оценки дисперсии σ^2 проводилась отдельная пробная серия экспериментов и оценивалась предельная погрешность измерения по критерию «трех сигма»: $\Delta_{\max} \approx 3\sigma$.

Тогда при значении квантиля распределения $u_k = 3$, формула (1.1) принимает вид

$$n = \left(\frac{\Delta_{\max}}{\varepsilon} \right)^2, \quad (1.2)$$

с доверительной вероятностью $\gamma = 0,999$.

Рассчитанное количество измерений округлялось в большую сторону до ближайшего целого числа. Для заданных условий экспериментов рассчитанное количество измерений равнялось пяти.

Для обработки полученных ЭМГ-сигналов использовался метод частотно-временного преобразования.

По зарегистрированным ЭМГ определялась средняя амплитуда спектральных отсчетов при максимуме сокращения мышцы (A_{cp}) и мощность сигнала (E).

$$A_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N |A_i|}{N}, \quad (1.3)$$

где A_i – амплитуда i -го отсчета зарегистрированного сигнала, N – число отсчетов сигнала.

Вышеуказанные параметры позволили оценить изменение ЭМГ-сигнала в зависимости от условий регистрации.

Определение энергетических параметров производилось на основе анализа полученных амплитуд ЭМГ-сигнала.

Рассчитывалась мощность для каждого значения ЭМГ-сигнала:

$$E_i = A_i^2. \quad (1.4)$$

Далее проводился расчет средних значений мощности для зарегистрированных сигналов [7]:

$$E_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N |E_i|}{N}. \quad (1.5)$$

Поскольку амплитуда и мощность полученных электромиограмм у испытуемых имели вариативный характер, обусловленный индивидуальными физическими данными, для повышения наглядности результатов анализа экспериментальных данных была выполнена их нормализация. Максимальное значение амплитуды (A_{\max}) и мощности (E_{\max}) в полученных электромиограммах наблюдались при межэлектродном расстоянии 30 мм. Относительно данных значений рассчитывались оставшиеся значения параметров. Нормализация данных выполнялась по формулам:

$$A_{\text{норм}} = \frac{A_{\text{ср}}}{A_{\text{max}}}, \quad (1.6)$$

$$E_{\text{норм}} = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{max}}}. \quad (1.7)$$

Результатом расчетов являлись одномерные массивы зависимостей средней амплитуды и средней мощности ЭМГ-сигналов от времени.

2 Результаты и обсуждение

Результаты количественной оценки ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* (средние значения и среднеквадратические отклонения в виде $M \pm m$) при различном расстоянии R между электродами для средней амплитуды, выраженной в микровольтах, приведены в таблице 2.1; для средней мощности, выраженной в микроваттах – в таблице 2.2.

На рисунке 2.1 приведены диаграммы, отражающие изменение нормированных значений средней амплитуды (a) и средней энергии (b) ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis* при изменении межэлектродного расстояния от 5 мм до 30 мм. Столбцы диаграмм соответствуют усредненной нормированной амплитуде (рисунок 2.1, a) и нормированной энергии (рисунок 2.1, b) ЭМГ-сигналов, линии черного цвета отражают диапазон изменения исследуемых параметров каждого из 11 участника испытания.

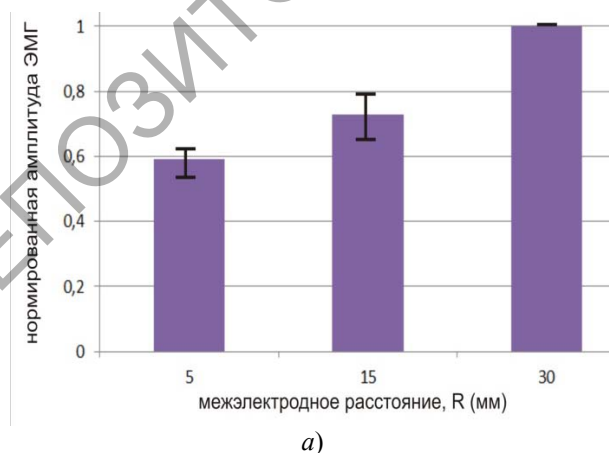


Таблица 2.1 – Средние значения амплитуды ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* при различных параметрах регистрации

№ испытуемого	$A_{\text{ср}}$, мкВ		
	$R=5$ мм	$R=15$ мм	$R=30$ мм
1	165,4 ± 17,05	219,5 ± 10,08	348,3 ± 71,23
2	122,5 ± 14,97	237,9 ± 24,19	273,6 ± 48,64
3	257 ± 33,35	318,3 ± 19,99	327,4 ± 21,35
4	138 ± 18,88	198,4 ± 12,79	229,8 ± 37,09
5	140,1 ± 17,39	205,3 ± 29,05	238,2 ± 36,92
6	105,5 ± 30,89	98,5 ± 4,02	165,3 ± 1,77
7	88,3 ± 13,43	133,6 ± 11,95	158,0 ± 22,77
8	141,6 ± 4,99	179,6 ± 6,09	313,4 ± 16,14
9	158,6 ± 17,04	189,3 ± 0,99	252,7 ± 0,07
10	114,0 ± 4,74	149,8 ± 19,52	206,0 ± 10,10
11	119,8 ± 30,41	154,8 ± 1,97	224,2 ± 70,42

Таблица 2.2 – Средние значения мощности ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* при различных параметрах регистрации

№ испытуемого	$E_{\text{ср}}$, мкВт		
	$R=5$ мм	$R=15$ мм	$R=30$ мм
1	38,9 ± 8,51	78,6 ± 9,89	106,3 ± 37,30
2	36,1 ± 6,80	78,3 ± 21,02	109,1 ± 33,01
3	47,4 ± 8,84	84,2 ± 7,76	251,6 ± 17,98
4	28,6 ± 7,23	76,8 ± 24,65	137,6 ± 47,02
5	118,7 ± 31,53	178,4 ± 20,24	194,8 ± 29,25
6	20,7 ± 12,31	17,2 ± 1,29	48,9 ± 0,99
7	13,3 ± 4,14	30,8 ± 6,01	44,5 ± 13,61
8	36,1 ± 2,29	56,7 ± 4,94	169,5 ± 19,28
9	44,4 ± 9,35	62,8 ± 2,16	113,8 ± 2,74
10	37,8 ± 18,68	39,7 ± 9,54	74,7 ± 1,02
11	27,5 ± 12,93	48,4 ± 0,34	102,1 ± 57,99

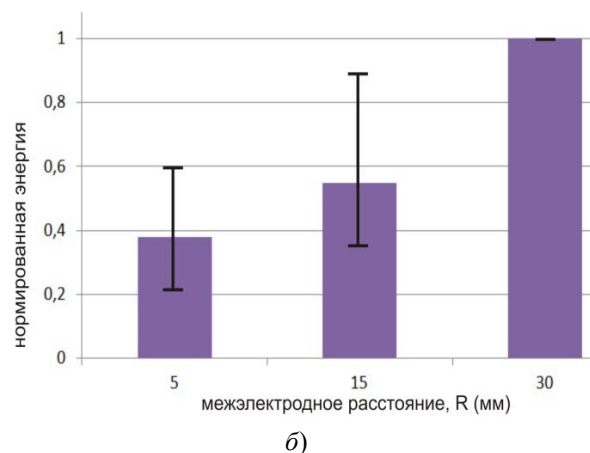


Рисунок 2.1 – Изменение средней амплитуды, выраженной в нормированных единицах $A_{\text{норм}}$ (а), и средней энергии, выраженной в нормированных единицах $E_{\text{норм}}$ (б), в зависимости от межэлектродного расстояния для ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis*

Количественное исследование средней амплитуды ЭМГ-сигнала мышцы *m. Gastrocnemius medialis* показало, что увеличение межэлектродного расстояния с 5 мм до 30 мм приводит к практически линейному росту амплитуды ЭМГ-сигнала примерно в 1,6 раза (см. рисунок 2.1, а). При увеличении расстояния между электродами в исследуемом диапазоне средняя мощность ЭМГ-сигнала растет, как и следовало ожидать, квадратично, (см. рисунок 2.1, б) и возрастает примерно в 2,6 раза. Данное обстоятельство хорошо согласуется с представлениями о характере электрических процессов в мышце. Действительно, возбуждаемые электрическими сигналами токи распространяются вдоль мышечных волокон. Причем проводимость мышечных тканей обусловлена не только их физическими свойствами, но и сложнейшими биохимическими и биофизическими процессами. Она имеет в основном ионную природу и сложным образом зависит от работы натрий-калиевых насосов клеток мышечной ткани. Линейность полученной зависимости означает, что в рассмотренном интервале мышечное волокно при разработке новых методик регистрации электромиограмм и технических средств для их реализации в первом приближении можно считать однородным проводником.

Определенный вопрос представляет экстраполяция зависимостей к нулевому расстоянию между электродами. Исходя из соображений о характере электрических процессов, следовало ожидать, что при нулевом расстоянии между электродами потенциал электрического импульса также окажется нулевым. Однако линейная экстраполяция приводит к значению порядка 0,4 от максимального, что не может быть отнесено на погрешность экспериментальных исследований и требует разработки методики и проведения исследований при малых межэлектродных расстояниях. В частности, одной из возможных причин данной особенности может выступать конечность контактной площади электродов.

Аналогичные исследования проведены для изучения влияния площади электродов на основные параметры электромиограмм: средней амплитуды, выраженной в микровольтах (таблица 2.3), средней мощности, выраженной в микроваттах (таблица 2.4). Проводилась регистрация электромиографического сигнала поверхностными электродами, диаметр D которых составлял 3 мм, 6 мм, 9 мм и 19 мм.

Количественный анализ ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* не позволил выявить каких-либо определенных закономерностей в изменении средних амплитуд и энергий для электродов различных диаметров. Поскольку проводящий электрод представляет собой эквипотенциальную поверхность, то фактически он производит усреднение принимаемых сигналов, заменяя усреднение по времени регистрации на усреднение по ансамблю, что дает аналогичный результат в силу эргодичности процесса. При линейной координатной зависимости измеряемой величины ее среднее значение совпадает со значением в середине интервала усреднения, что, собственно, и отмечается в эксперименте. Максимальные значения исследуемых энергетических параметров у испытуемых регистрировались при различных значениях диаметра электродов (таблицы 2.3–2.4).

На рисунке 2.2 приведены графики, отражающие изменение нормированных значений средней амплитуды (а) и средней мощности (б) ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis* при изменении диаметра электродов от 3 мм до 19 мм. На приведенных графиках по оси абсцисс указывается расстояние между центрами электродов в миллиметрах, по оси ординат – значение амплитуды и энергии в относительных единицах. Столбцы диаграмм соответствуют усредненной нормированной амплитуде (рисунок 2.2, а) и нормированной энергии (рисунок 2.2, б) ЭМГ-сигналов, линии черного цвета отражают диапазон изменения исследуемых параметров каждого из 11 участников эксперимента.

Таблица 2.3 – Средние значения амплитуды ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* при различных значениях диаметра регистрирующих электродов

№ испытуемого	A_{cp} мкВ			
	$D=3$ мм	$D=6$ мм	$D=9$ мм	$D=19$ мм
1	266,9 ± 12,35	231,5 ± 9,86	332,7 ± 32,26	355,4 ± 17,12
2	269,2 ± 15,48	248,2 ± 6,64	192,5 ± 27,51	181,9 ± 24,34
3	218,7 ± 14,89	215,2 ± 21,19	181,1 ± 16,05	161,9 ± 16,05
4	235,5 ± 18,23	285,2 ± 16,45	246,9 ± 20,01	283,4 ± 9,77
5	162,9 ± 19,56	183,5 ± 16,48	182,7 ± 22,42	187,0 ± 11,83
6	532,1 ± 26,11	371,8 ± 9,35	306,3 ± 12,84	334,3 ± 25,36
7	183,8 ± 18,63	142,2 ± 13,55	159,1 ± 30,25	152,4 ± 7,02
8	286,7 ± 12,77	227,4 ± 9,47	208,7 ± 17,14	199,0 ± 5,49
9	259,7 ± 17,82	309,1 ± 8,13	247,4 ± 8,06	289,6 ± 16,28
10	324,8 ± 14,36	373,3 ± 17,51	334,4 ± 17,58	328,5 ± 24,23
11	149,5 ± 29,41	138,57 ± 3,75	119,3 ± 18,98	114,7 ± 6,84

Таблица 2.4 – Средние значения мощности ЭМГ-сигналов мышцы *m. gastrocnemius medialis* при различных параметрах регистрации

№ испытуемого	E_{cp} , мкВт			
	$D=3\text{мм}$	$D=6\text{мм}$	$D=9\text{мм}$	$D=19\text{мм}$
1	158,2 ± 9,36	102,8 ± 18,10	205,3 ± 11,06	223,2 ± 11,29
2	132,3 ± 17,36	111,9 ± 8,48	64,9 ± 7,92	59,5 ± 7,18
3	108,9 ± 5,17	102,5 ± 17,68	77,4 ± 8,31	57,39 ± 6,05
4	98,4 ± 12,54	148 ± 9,57	110,8 ± 9,81	144,9 ± 13,42
5	49,6 ± 6,34	66,6 ± 5,37	60,5 ± 5,32	63,7 ± 4,01
6	488,1 ± 21,53	292,8 ± 16,25	200,3 ± 13,73	219,8 ± 16,39
7	68,4 ± 13,78	39,2 ± 9,36	46 ± 4,09	45,6 ± 7,05
8	187,3 ± 4,36	117,3 ± 11,99	94,2 ± 3,09	83,9 ± 4,76
9	145,1 ± 9,39	193,8 ± 8,30	123,3 ± 7,34	162,9 ± 21,09
10	210 ± 14,18	291 ± 6,39	228,5 ± 11,24	203 ± 11,80
11	40,4 ± 9,49	36,3 ± 2,07	25,8 ± 1,09	23,8 ± 3,07

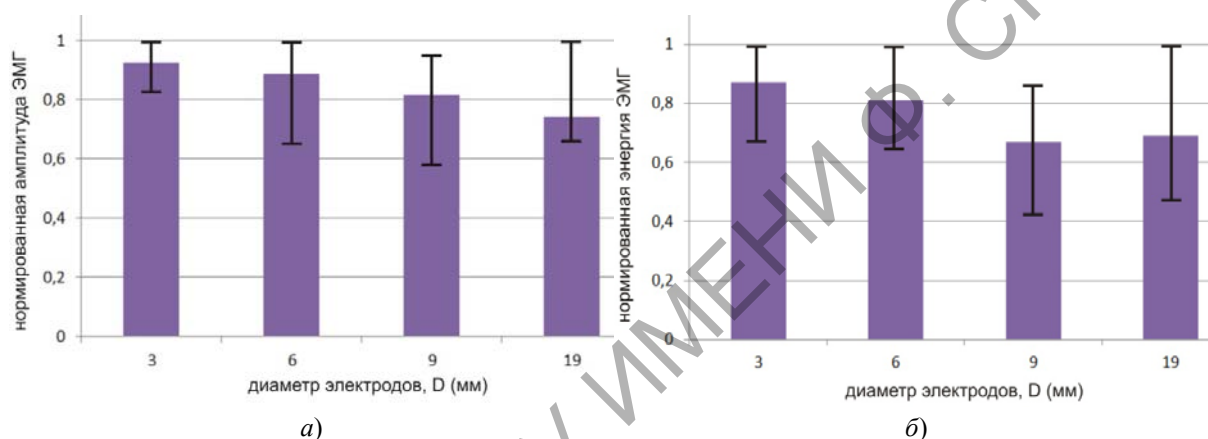


Рисунок 2.2 – Изменение средней амплитуды, выраженной в нормированных единицах $A_{норм}$ (а), и средней энергии, выраженной в нормированных единицах $E_{норм}$ (б), в зависимости от диаметра электродов для ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis*

Качественное исследование средней амплитуды ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis* показало, что при увеличении диаметра электродов с 3 мм до 19 мм наблюдается тенденция незначительного снижения усредненных значений данного параметра, при этом велика вариативность зарегистрированных значений (см. рисунок 2.2, а). Аналогичное незначительное влияние увеличения диаметра электродов зафиксировано при исследовании ряда средних значений мощности ЭМГ-сигнала исследуемой мышцы.

Заключение

Проведены исследования суммарной электромиограммы мышцы *m. gastrocnemius medialis* у 11 человек. Для количественной оценки суммарной электромиограммы исследуемой мышцы использовались нормированные значения средней амплитуды и средней мощности ЭМГ-сигнала, которые позволили учесть энергетические параметры нестационарного биоэлектрического сигнала и эффективно проанализировать ЭМГ-сигнал.

Установлено, что увеличение межэлектродного расстояния в диапазоне от 5 мм до 30 мм приводит к росту средней амплитуды и средней мощности зарегистрированного ЭМГ-сигнала мышцы *m. gastrocnemius medialis* на $55 \pm 8\%$. При этом не выявлена зависимость параметров суммарной электромиограммы мышцы *m. gastrocnemius medialis* от площади электродов для диаметров электродов от 3 до 19 мм.

Выявленные закономерности позволили сделать вывод о том, что для повышения точности и объективности диагностических исследований методами поверхностной электромиографии необходимо контролировать межэлектродное расстояние.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке новых методик регистрации электромиограмм и технических средств для их реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гехт, Б.М. Теоретическая и клиническая электромиография / Б.М. Гехт. – Л. : Наука, 1990. – 229 с.

2. Зайченко, К.В. Съём и обработка биоэлектрических сигналов / К.В. Зайченко, О.О. Жаринов, А.Н. Кулин. – СПб, 2001.

3. Зенков, Л.Р. Функциональная диагностика нервных болезней / Л.Р. Зенков, М.А. Ронкин. – М. : Медицина, 1991 – 623 с.

4. Райгайян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р.М. Райгайян. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.

5. Осипов, А.Н. Оценка эвакуаторной функции желудочно-кишечного тракта на основе частотно-временного анализа электромиограмм нервно-мышечных тканей / А.Н. Осипов [и др.] // Инженерный вестник. – 2009. – № 1 (27). – С. 92–97.

6. Сидоренко, А.В. Нелинейный анализ электромиограмм на основе вейвлет-преобразования / А.В. Сидоренко, А.П. Селицкий // Доклады БГУИР. – 2008. – № 2 (32). – С. 12–18.

7. Осипов, А.Н. Спектральный анализ сигналов электростимуляции нервно-мышечной ткани

/ А.Н. Осипов, М.В. Давыдов. – Доклады БГУИР, Мн. – 2005. – № 3 (11). – С. 53–58.

8. *An introduction to electromyography* / København. – Gyldendals, 1957. – 43 p.

9. ГОСТ 24878-81. Электроды для съема биоэлектрических биопотенциалов : Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1982.

10. ГОСТ 25995-83. Электроды для съема биоэлектрических потенциалов: Общие технические требования и методы испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1984.

11. Меженная, М.М. Современные методы анализа суммарной электромиограммы нервно-мышечного аппарата человека в норме и при патологии / М.М. Меженная // Новости медико-биологических наук, Минск. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 49–58.

Поступила в редакцию 22.02.13.