

17. Филатов Д.О., Зобков В.А. Соревновательная среда и эмоциональные состояния борцов греко-римского стиля / «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Труды XIV Международной научной конференции. 1-3 июля 2020 года, г. Владимир. Кн. 2. С. 355-358.
18. Логинов С.И., Кинтохин А.С., Снигирев А.С. Стохастическая и хаотическая оценки каденции ходьбы: биомеханические, возрастные и гендерные ассоциации / «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Труды XIV Международной научной конференции. 1-3 июля 2020 года, г. Владимир. Кн. 2. С. 327-331.
19. Оленев Е.А., Сушкова Л.Т. Создание искусственного микроклимата / «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Труды XIV Международной научной конференции. 1-3 июля 2020 года, г. Владимир. Кн. 2. С. 388-391.
20. Залата О.А., Евстафьевая Е.В., Астафуров Д.Д., Слюсаренко А.А., Прасолов Н.С. Психоэмоциональная метеолабильность и метеочувствительность взрослых жителей Республики Крым с разным состоянием здоровья / «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Труды XIV Международной научной конференции. 1-3 июля 2020 года, г. Владимир. Кн. 2. С. 320-324.

Александр Евгеньевич Северин,
д-р мед. наук, профессор,
кафедра «Нормальная физиология»,
Медицинский институт,
ФГАОУ «Российский университет
дружбы народов»,
ведущ. научный сотрудник,
ФНКЦ реаниматологии и реабилитологии,
г. Москва,
Людмила Тихоновна Сушкова,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Биомедицинские
и электронные средства и технологии»,
Тамара Ешинимаевна Батоцыренова,
д-р биолог. наук, доцент, зав. кафедрой,
кафедра «Теоретические и медико-
биологические основы физической культуры»,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г. Владимир,
e-mail: ludm@vlsu.ru

Н.Т. Абдуллаев, К.Ш. Пашаева

Методы и средства оценки асимметрии мышц при анализе электромиографических сигналов

Аннотация

Представлены обобщенные сведения о возможностях оценки асимметрии и перспективах средств исследований в рамках научного направления «Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата» по докладам на XIV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в экологии и медицине – ФРЭМЭ'2020». Отмечена важная роль выбора разных методов для обработки электромиографических сигналов, результаты которых могут рассматриваться в качестве объективного критерия оценки асимметрии мышц конечностей. Рассмотрены аппаратные средства оценки, которые полезны и применимы для вспомогательных устройств на основе ЭМГ-контроля, где важна величина сигнала ЭМГ.

Процессы эволюции сложных систем, к числу которых относятся и биологические, связаны с явлением нарушения симметрии. Это приводит к необходимости исследования показателей асимметрии в изучении поведения сложных систем [1]. Асимметрия используется как самый лучший метод для отображения возможных вариаций при исследовании конечностей скелетной системы. Наблюдаемая асимметрия конечностей скелетной системы связана с механическими и генетическими факторами. За последние несколько лет популярность исследований в области электромиографии возросла. Прогрессивное понимание человеческого тела, высокая осведомленность при изучении преимуществ междисциплинарных исследований, развитие сенсорных технологий и экспоненциальный рост вычислительных способностей компьютеров – все это факторы, способствующие расширению исследований ЭМГ. Отдельная секция на международной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020» связана с этой областью исследования; обсуждение данной проблемы еще раз подтверждает важность предметной области.

Функциональная асимметрия является неотъемлемой особенностью мозга человека, которая проявляется в различных формах поведения и двигательной деятельности человека [2]. Изучение функциональной асимметрии и латеральных предпочтений важно не только с теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку от ее выраженности может зависеть как эффективность выполнения спортивных двигательных действий, так и вероятность травматизма [3], [4]. Именно эти направления исследований двигательной асимметрии в спорте остаются наиболее актуальными. Целью исследования в работе [5] было изучение общих и индивидуальных особенностей асимметрии скоростно-силовых показателей мышц колен-

ного сустава у баскетболистов-паролимпийцев и ее связь с результатами в прыжковых упражнениях.

Существуют разные подходы для оценки асимметрии различных органов человека. В работе [5] рассчитывался коэффициент асимметрии как отношение разности минимального и максимального значений ЭМГ симметричных мышц к большему значению.

В работе [6] для оценки асимметрии использован ЭЭГ-метод нормированного количественного показателя – коэффициент асимметрии.

В работе [7] при визуализации восстановленного кардиосигнала также использован и оценивается коэффициент асимметрии.

Коэффициент асимметрии – широко используемый параметр в статистическом анализе – характеризует асимметрию статистического распределения. Таким образом, в основе вариационной статистики оценки сократительных свойств мышц лежит коэффициент асимметрии. По степени отклонения коэффициента асимметрии от медианы, как правило, можно судить о величине плотности распределения Гаусса. Чем ближе показатель асимметрии к медиане, тем выше плотность распределения Гаусса. Величина отклонения показателя асимметрии от медианы определяется величиной стандартного отклонения от среднего. Для нормального распределения 95 % значений заключено в пределах двух стандартных отклонений от среднего и 68 % – в пределах одного стандартного отклонения [8].

Для эксперимента были выбраны 6 мышц нижних конечностей пациента с диагнозом асимметрии. Измерительные сигналы получены от 12 отведений, попарно с правой и левой частей конечностей.

Экспериментальные данные наглядно способствуют не только удобному сравнению результатов, но и дают прогнозные заключения о возможной патологии мышц. Значение между интервалом $0,25 < x < 0,5$ можно использовать как наклонность к асимметрии [9].

Основная цель сегментных методов исследования тела – получение оценок состава и различий отдельных сегментов тела. Такой анализ может выполняться как в статике, так и в динамике при различных воздействиях. Анализируемыми сегментами тела обычно являются конечности и туловище, а в некоторых случаях и голова. Можно условно принять диапазон изменения A от 0 до 1. Если принять степень асимметрии, равную 0,5, как средний уровень, то величина $< 0,5$ оценивается как низкая степень, а величина $> 0,5$ – как высокая степень асимметрии. Для показанных примеров оценку степени асимметрии можно проводить по шкале, рассмотренной в [9]. Предложенный подход дает возможность количественно оценить степень тяжести асимметрии исследуемых конечностей. По сравнению с результатами прямых измерений с последующей визуализацией полученного протокола предложенная методика оценки степени асимметрии, а затем и тяжести асимметрии исследуемых мышц является более приемлемой. Для получения достоверных и воспроизводимых результатов на примере 30 пациентов были соблюдены все требования процедуры измерения. Оценка степени асимметрии мышечной силы по предложенной методике позволяет врачу-эксперту точно оценить различия значений биопотенциалов исследуемых мышц конечностей и эффективно использовать методику лечения для уменьшения степени асимметрии [9].

Одним из распространенных методов оценки асимметрии среди спортсменов является метод изокинетического теста [10]. Этот метод дает возможность оценить асимметрию при измерении силы мышц. В изокинетических зажимах скорость захвата скелетных мышц стабильна. В зависимости от назначения зажима в изокинетическом зажиме каждое движение осуществляется с одной стабильной скоростью. В противоположность этому в изотонических зажимах удержать скорость движения стабильной невозможно. Движения в изокинетических зажимах реализуются в следующих фазах:

- a) фаза ускорения – фаза ускорения движения;
- b) фаза изокинетической нагрузки – фаза движения, в которой осуществляется стабильная скорость при одинаковом сопротивлении.

Результаты эксперимента показали, что минимальная разность между правой и левой мышцами составляет 5 Вт/кг, а максимальная разность – 70 Вт/кг. Разность между этими значениями составляет 65 Вт/кг. Если разность силы равна и меньше 37 (32 + 5) Вт/кг, то этот случай можно принять как естественную асимметрию, а большие значения требуют лечения.

Существуют виды асимметрии, которые являются причиной патологических нарушений, что в результате может привести к серьезным патологиям. Мышечный дисбаланс – это нарушение равновесия суммы противоборствующих сил между мышцами. Асимметрия мышечной массы и несбалансированный мышечный тонус могут привести даже к нерегулярности скелетной структуры, а потому проблема выявления и лечения этих нарушений остается весьма актуальной. Хаотичность динамических процессов биологической системы и фрактальные свойства биосигналов, получаемых от различных структур организма, требуют описания происходящих в этих системах процессов с применением нелинейной динамики, теории динамического хаоса, фрактального анализа, анализа интервальных статистик и др. На основе применения таких методов анализа возможно получение диагностических информативных показателей, присущих каждому из методов, которые могут служить ранними предвестниками заболевания конкретного органа.

В настоящее время в клинических условиях оценка асимметрии проводится по максимуму значения амплитуды силы мышцы. Несмотря на то что этот процесс включает в себя «максимальную сократимость мышцы – достижение пика – максимальную

мальное расслабление мышцы», как информативный результат учитывается только значение пика. Если рассматривать весь процесс как динамический временной ряд, то для принятия решения надо учесть вклад всех элементов, в совокупности создающих этот процесс. Для исследования всех данных динамического ряда и минимального шага размера окна в один отсчет необходимо обеспечить кратность длины записи и размера окна. Для этого сегментация осуществляется в два прохода, выполняемых в противоположных направлениях.

С целью демонстрации возможности использования этого метода для количественной оценки асимметрии мышц пациента проведем тестирование изложенного метода на ЭМГ-сигналах. Вычисления проводятся для каждого множества раздельно. В экспериментах использованы сигналы мышц: Quadriceps femoris muscle – rectus femoris, Quadriceps femoris muscle – vastus lateralis, Quadriceps femoris muscle – vastus medialis, Gastrocnemius muscle – lateral part, Gastrocnemius muscle – medial part, Biceps femoris muscle – соответственно для левой и правой частей.

В соответствии с вышеуказанным алгоритмом для вычислительного эксперимента использовались медицинские записи мышц Quadriceps femoris muscle-vastus lateralis, полученные 16-канальным электромиографом МЕ6000 в латеральной и медиальной частях мышц (правой и левой).

В полученных результатах показателя Херста при значениях $q > 2$ можно наблюдать хорошо различаемые значения показателя, что дает возможность использовать его в качестве информационного показателя. Для полученных значений $h(q)$ определяется соотношение $h_{(q)}^L > h_{(q)}^R$, и это наблюдается при положительных значениях q . Результаты показывают, что предлагаемый метод приемлем и для анализа выявления асимметрии конечностей человека. Можно считать, что величины, которые используются как основные характеристики мультифракталов, являются информативными признаками для обнаружения нарушений асимметрии конечностей. Полученные результаты показывают, что для выявления асимметрии конечностей целесообразно использовать показатель Херста и значение спектральной функции, так как информативный диапазон в этом случае более широкий, чем у показателя Ренни [11].

Следует отметить, что использование сложных математических методов обработки получило широкое распространение в последние десятилетия с точки зрения повышения точности расчетов и достоверности результатов диагностики. Разработка устройств обработки, основанных на применении таких методов, является недостаточной с точки зрения алгоритмов обработки и конструктивной реализации. В связи с этим не теряет актуальности и применение классических методов обработки.

Корреляционные функции характеризуют стабильные статистические характеристики ЭМГ. Некоторые из этих особенностей имеют рабочее или феноменологическое значение при интерпретации ЭМГ, а некоторые открывают новые интересные пути в нейрофизиологическом анализе нейромоторного аппарата.

В настоящее время для определения асимметрии в клинических условиях анализ выполняется на основе максимального значения путем измерения силы сигналов ЭМГ, т. е. значение амплитуды измеряемых сигналов принимается за показатель максимальной асимметрии. Однако это не позволяет определить степень асимметрии окружающих мышц и оценить, какая из различных мышц с одинаковым максимальным значением амплитуды имеет самую высокую степень асимметрии. Это важная информация при назначении и лечении. В связи с этим целью исследования является выбор математического статистического метода, позволяющего устранить недостатки, выявленные при определении асимметрии, и провести сравнительный анализ. Во взаимно корреляционном анализе ЭМГ находится интеграл от производных двух различных функций. Если они не полностью независимы и фазовые отношения случайны, то функция взаимной корреляции будет равна нулю для

произвольного τ . Если процессы связаны и фазы любой из двух кривых при τ часто перекрываются, то функция взаимной корреляции τ будет положительной при рассматриваемом значении. Некоторые патологические изменения, условия труда, привычки, некоторые виды спорта являются источником асимметрии и могут вызвать серьезные осложнения в организме. Это приводит к патологии той части, которая через определенный период потребляет больше энергии. Метод корреляционного анализа, позволяющий определить выраженную асимметрию по сигналам ЭМГ и судить об ее уровне в различных измерениях, позволяет легко сравнивать результаты визуально, а также определять уровень асимметрии в других мышцах [12].

Прогрессивное понимание человеческого тела, высокая осведомленность при изучении преимуществ междисциплинарных исследований, развитие сенсорных технологий и экспоненциальный рост вычислительных способностей компьютеров – все это факторы, способствующие расширению исследований ЭМГ. Имея так много информации и так много разных исследовательских целей, часто легко не заметить запутанность, точность и изящество, связанные с записью качественных сигналов ЭМГ.

Учитывая наличие физиологических и физических артефактов при измерении и обработке ЭМГ-сигналов, актуален вопрос их фильтрации. Фильтры бесконечного импульсного отклика (ПИР) являются фундаментальной техникой обработки сигналов для анализа поверхностной электромиографии. Параметры фильтров определяются их конкретными порядками (например, первого, второго или третьего порядка) и частотой среза. Хотя сигналы ЭМГ от скелетных мышц человека важны для реализации функций мышц, но в литературе нет согласованности относительно влияния порядка фильтра и частоты среза при обработке и фильтрации сигнала ЭМГ для разных конечностей. Поэтому важно знать реакцию мышечного ЭМГ-сигнала после изменения порядка фильтров и частоты среза. Исходя из обсуждаемых и других исследований, для эксперимента был выбран фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) разного порядка и разными частотами среза. Поведение БИХ-фильтра можно обобщить при помощи так называемой функции АЧХ. Для измерения качества фильтрации используется пиковое отношение сигнал/шум (PSNR), которое обратно пропорционально искажению сигнала, т. е. его числовое значение уменьшается с увеличением искажения в восстановленном сигнале. Таким образом, чем выше PSNR, тем лучше качество сжатого или восстановленного сигнала. Получается, что при выборе более высокой частоты среза, например 6 Гц, порядок фильтра не влияет на выходной сигнал, как это происходит при частоте среза 4 Гц. При этом мы имеем почти те же результаты даже при значительном изменении порядка фильтра. Таким образом, с ростом порядка фильтра амплитуда сигнала также увеличивается [13]. Рассматривается влияние порядка фильтра и параметров частоты среза на фильтр ПИР Баттервортса для сглаживания сигнала поверхностного ЭМГ-сигнала от мышцы Biceps Femoris. Фиксация порядка фильтра и изменение частоты среза показали большее искажение сигнала, чем при фиксации частоты среза и изменении порядка фильтра. Можно сделать вывод, что порядок фильтра оказывает меньшее влияние на выходной сигнал по сравнению с влиянием изменения частоты среза. Это исследование может быть полезным и применимым для вспомогательных устройств на основе ЭМГ-контроля, где важна величина электромиографического сигнала.

Список литературы:

1. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Показатели симметрии в кластерном анализе сложных систем / Труды XIV Международной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020», Владимир-Сузdalь, 1-3 июля 2020 года. Кн. 1. С. 168-172.
2. Функциональные асимметрии / <http://oddandeven.narod.ru/FunctionalAsymmetryOfHuman/104.htm> (дата обращения 08.03.2020).
3. Цветков М.С., Фишиман Б.Б. Использование методов описательной статистики для оценки сократительных свойств мышц по данным вызванных одиночных сокращений у спортсменов различной специализации // Вестник Новгородского государственного университета. 2005. № 32. С. 26-30.
4. Безгодков Ю.А., Федотов А.Л., Аболин А.Б. и др. Способ оценки функционального укорочения нижней конечности / Патент RU2532880 C1; опубл. 10.11.2014.
5. Колесников С.В., Сайфутдинов М.С., Чегуров О.К., Колесникова Э.С. Динамика функционального состояния мышц нижних конечностей у больных после эндопротезирования тазобедренного сустава в условиях применения мягкотканной мануальной техники // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 124.
6. Руководство по функциональной межполушарной асимметрии. – М.: Научный мир, 2009. 836 с.
7. Исакович Д.В., Исакович В.В. Кардиоайгеноскоп – новая полезная модель обработки ЭКГ. – М.: Изд-во «Перо», 2014. 138 с.
8. Абдуллаев Н.Т., Исмайлова К.Ш. Оценка асимметрии электромиографических сигналов с помощью статистического распределения коэффициентов асимметрии / Труды XIII Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2018». Владимир-Сузdalь, 3-5 июля 2018 года. Кн. 1. С. 177-181.
9. Абдуллаев Н.Т., Исмайлова К.Ш. Оценка степени асимметрии по измеренной мышечной силе конечностей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2017. № 12. С. 13-17.
10. Исмайлова К.Ш. Оценка асимметрии в мышцах конечностей на основе результатов изокинетического теста // Научные труды Азербайджанского технического университета. 2018. № 3. С. 185-191.
11. Абдуллаев Н.Т., Исмайлова К.Ш. Оценка асимметрии мышц конечностей на основе метода мультифрактального флюктуационного анализа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 13-18.
12. Исмайлова К.Ш. Использование метода корреляционного анализа для оценки уровня асимметрии в мышцах // Научные труды Азербайджанского технического университета. 2017. № 2. С. 95-101.
13. Абдуллаев Н.Т., Исмайлова К.Ш. Анализ параметров цифровых фильтров для обработки электромиографических сигналов / Труды XIV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020», Владимир-Сузdalь, 1-3 июля 2020 года. Кн. 2. С. 111-115.

Намик Таир Абдуллаев,
д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой,
кафедра биомедицинской техники,
Азербайджанский технический университет,
Кямала Ширин кызы Пашиева,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра автоматизации процессов,
Бакинская высшая школа нефти,
Азербайджанская Республика,
г. Баку,
e-mail: nabdullahayev.46@mail.ru