

УДК 621.38

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_33

СИНТЕЗ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМИОГРАММ

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, Д.А. Котов, П.И. Балтрукович

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

SYNTHESIS OF ELECTROSTIMULATION SIGNALS BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSES OF ELECTROMYOGRAMS

A.N. Osipov, I.O. Khazanovsky, D.A. Kotov, P.I. Baltrukovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Аннотация. Представлены результаты исследования характеристик поверхностных электромиограмм (ЭМГ) скелетных мышц человека, снятых при типичных движениях. Определены наиболее преобладающие частоты в спектре ЭМГ в момент воздействия на мышцу, выявлены закономерности изменений в спектре ЭМГ с увеличением развиваемого мышцей усилия. Предложено синтезировать сигналы электростимуляции в системе с биотехнической обратной связью с использованием выявленных закономерностей.

Ключевые слова: синтез сигналов электростимуляции, частотно-временной анализ электромиограмм.

Для цитирования: Синтез сигналов электростимуляции на основе частотно-временного анализа электромиограмм / А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, Д.А. Котов, П.И. Балтрукович // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 33–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_33

Abstract. The research results of surface electromyograms (EMG) characteristics of human skeletal muscles, recorded during typical movements are introduced. The most dominant frequencies in the EMG spectrum, during the influence on a muscle, as well as the patterns of change in the EMG spectrum with an increase in the force developed by a muscle, are discovered. It was suggested to synthesize electrostimulation signals into a system with biotechnical feedback, using the discovered patterns.

Keywords: synthesis of electrostimulation signals, time-frequency analysis of electromyograms.

For citation: Synthesis of electrostimulation signals based on time-frequency analyses of electromyograms / A.N. Osipov, I.O. Khazanovsky, D.A. Kotov, P.I. Baltrukovich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 1 (50). – P. 33–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_33 (in Russian)

Введение

Современный уровень информационно-коммуникационных технологий предоставляет обширные возможности для развития электронного здравоохранения с целью повышения качества и продолжительности жизни людей. Для лечения ряда заболеваний в настоящее время применяют электростимуляционные методики на базе компьютерных систем с обратной связью. Системы электростимуляции с обратной связью позволяют в режиме реального времени осуществлять индивидуальный контроль отдельных физиологических параметров, в соответствии с которыми вырабатывается терапевтическое воздействие [1]. Выработка оптимального воздействия осуществляется на основе анализа импедансных характеристик биотканей. Широко применяются в практике системы, в которых управляющее воздействие синтезируется на основе электромиограмм, снятых с мышц-доноров [2]. В данной работе приведены результаты частотно-временного анализа электромиограмм групп мышц, на основании которого предложен алгоритм корректировки параметров воздействия (частоты

стимуляции) в зависимости от вызываемого мышечного усилия.

1 Частотно-временной анализ ЭМГ биотканей

Исследования интерференционных электромиограмм (ИЭМГ) различных мышечных групп, снятых при типичных движениях, проведены на электромиографе Comras фирмы NICOLET. Частота дискретизации ИЭМГ – 1000 Гц. Частотно-временной анализ значимой части суммарной электромиограммы выполняется в соответствии с алгоритмом быстрого оконного преобразования Фурье, описанным в [3], [4], [5]. С помощью программного пакета MatLab построены спектрограммы сигналов ИЭМГ. При построении использовано прямоугольное окно длиной 256 выборок. В исследовании участвовало 9 добровольцев в возрасте от 19 до 22 лет.

На рисунке 1.1, а) представлена электромиограмма, полученная при сокращении двуглавой мышцы плеча, а на рисунке 1.1, б) – соответствующая спектрограмма. На рисунках 1.2, а) и 1.2, б) – соответственно электромиограмма и

спектрограмма сокращения дельтовидной мышцы, рисунке 1.3 – продольной мышцы живота, рисунке 1.4 – короткой мышцы, отводящей большой палец кисти. Для простоты восприятия отображаемые спектрограммы содержат только гармоники, которые имеют амплитуду не меньше 0,7 от максимальной амплитуды. Гармоники с максимальной амплитудой отображаются наиболее темным цветом. Таким образом, на рисунке представлены наиболее преобладающие в текущий момент времени частоты в спектре ИЭМГ.

Для крупных мышц (двуглавая мышца плеча, дельтовидная мышца, (рисунок 1.1, рисунок 1.2), основная энергия сигнала ИЭМГ приходится на частоты, не превышающие 150 Гц, для продольной мышца живота – 250 Гц. Для более мелких мышц (мышца, отводящая большой палец) – до 500 Гц.

С увеличением усилия, развиваемого мышцей, наблюдаются следующие закономерности в спектре ИЭМГ всех испытуемых волонтеров. Первая – средняя частота спектра, которая преобладает в спектре в данный момент времени, возрастает.

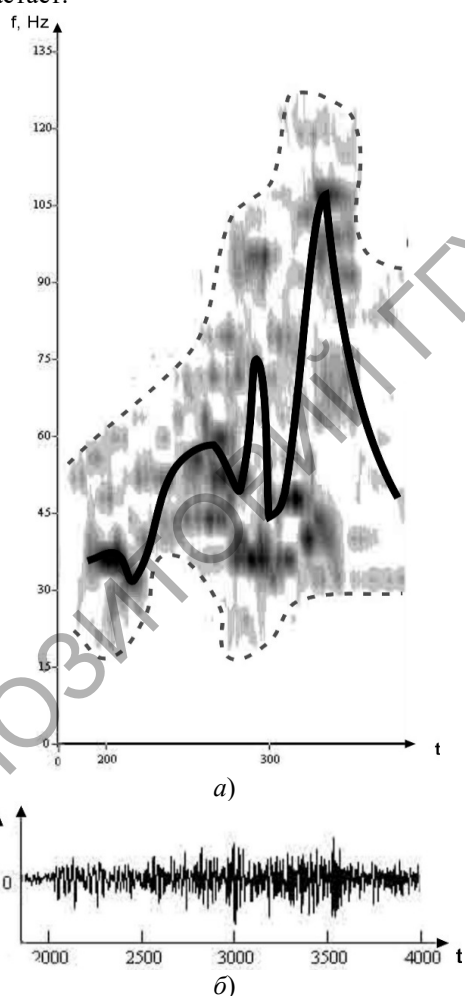


Рисунок 1.1 – Спектрограмма (а) и электромиограмма (б), полученная при сокращении двуглавой мышцы плеча

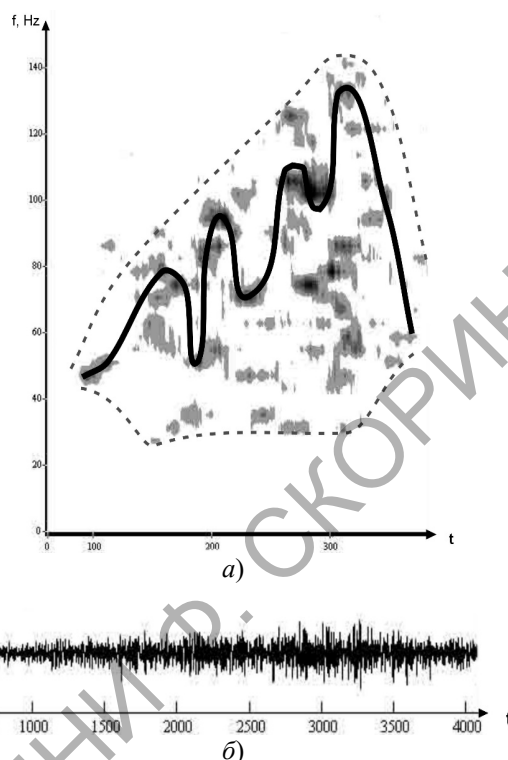


Рисунок 1.2 – Спектрограмма (а) и электромиограмма (б), полученная при сокращении дельтовидной мышцы

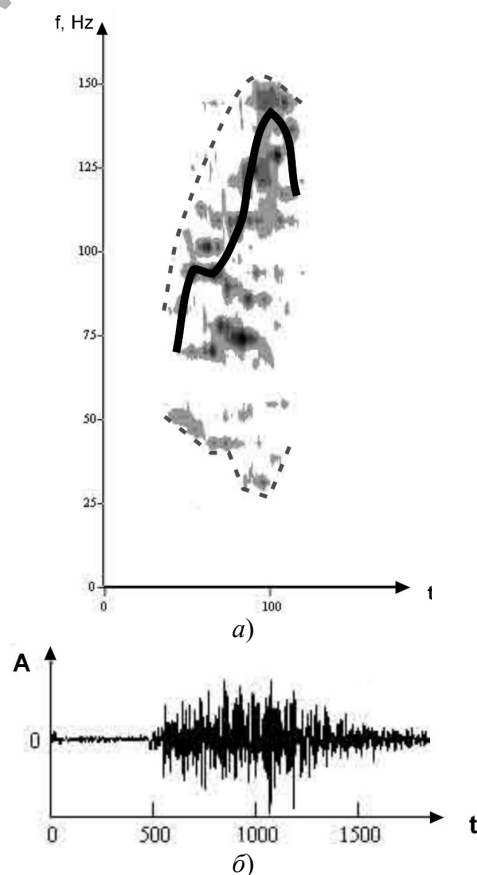


Рисунок 1.3 – Спектрограмма (а) и электромиограмма (б), полученная при сокращении продольной мышцы живота

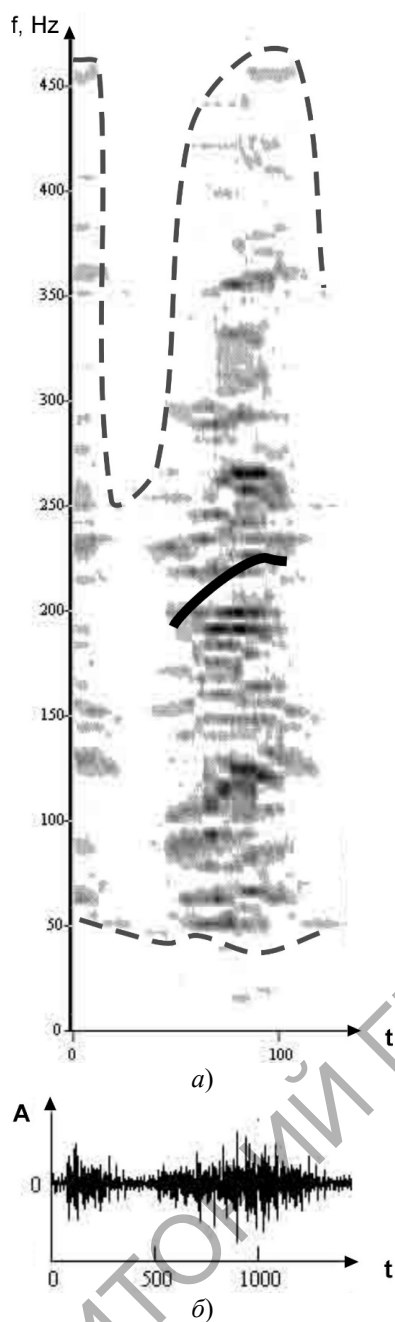


Рисунок 1.4 – Спектрограмма (а) и электромиограмма (б), полученная при сокращении мышцы, отводящей большой палец кисти

Средняя частота спектра f_{cp} определена в эффективной полосе спектра сигнала $f_{max}-f_{min}$ [6], для которой энергия сигнала в полосе $f_{max}-f_{cp}$ равна энергии в полосе $f_{cp}-f_{min}$. Выявленная закономерность может быть объяснена линейной зависимостью между величиной изометрического напряжения мышцы и частотой импульсации двигательных единиц. При сокращении двуглавой мышцы плеча здорового человека, средняя частота спектра ЭМГ возрастает от 40–50 до 120–130 Гц. Время нарастания частоты составляет 0,5–1 с. При расслаблении мышцы наблюдается

обратный процесс. Более мелкие мышцы, обеспечивающие в эксперименте более быстрое движение, характеризуются меньшим временем нарастания частоты (~50 мс). Вторая закономерность – с увеличением усилия, развиваемого мышцей, расширяется полоса преобладающих частот. Физиологической причиной этого, предположительно, является то, что с увеличением усилия увеличивается количество участвующих в сокращении тонических и фазических двигательных единиц.

2 Алгоритм управления несущей частотой стимула на основе минимума фазо-частотной характеристики

Выявленные закономерности предлагается использовать при синтезе оптимальных сигналов электростимуляции в системах электростимуляции с биотехнической обратной связью (рисунок 2.1).

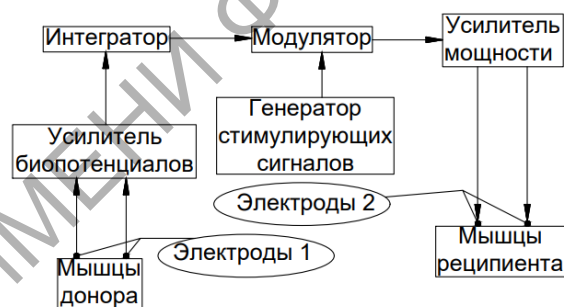


Рисунок 2.1 – Система электростимуляции с биотехнической обратной связью

Сигналы ИЭМГ, отводимые при выполнении движения от тех или иных мышц донора с помощью поверхностных электродов, используются для управления сигналами электростимуляции. Для этого сигнал электромиограммы, снятый с помощью электродов с нервно-мышечных групп донора через усилитель биопотенциалов, подается на интегратор 1, выполняющий выделение огибающей. Далее сигнал огибающей поступает на один из входов модулятора, на второй подается сигнал с генератора стимулирующих сигналов. Сигнал с выхода модулятора через усилитель мощности подается на электроды, расположенные на идентичных мышцах реципиента. Биоуправляющие сигналы в данном случае описываются выражением:

$$S(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \Theta),$$

где $A(t)$ – огибающая ИЭМГ, ω_0 – частота синусоидальных колебаний, Θ – начальная фаза колебаний.

Синтезированные таким образом стимулы содержат только низкочастотные гармоники спектра ИЭМГ. Для получения стимулирующего воздействия адекватного естественным сигналам, вызывающим активность мышц, необходимо

учитывать компоненты ИМГ, соответствующие силе и скорости сокращения мышцы. Учитывая выявленные при анализе спектрограмм закономерности (рост средней частоты и расширение спектра преобладающих частот ИЭМГ с увеличением развиваемого мышцей усилия), сигнал электростимуляции предлагается синтезировать в соответствии с выражением:

$$S(t) = A(t) \sum_i^n \cos(\omega_0^i(t) + \omega_a(t))t,$$

где $i = 1 \dots n$; $f_A(t)$ – нормировочная функция, определяющая изменение ширины спектра сигнала при изменении мышечного усилия, $A(t)$, $\omega_a(t)$ – девиация частоты.

Заключение

Таким образом, установлена зависимость между силой, развиваемой мышцей, полосой преобладающих частот и средней частотой возбуждающих ее электрических потенциалов. Соответствующие частоты различаются для морфологически различных мышц. Время нарастания частоты пропорционально скорости сокращения мышечных волокон. С целью получения максимального терапевтического эффекта на основании полученных результатов предложен метод синтеза биоуправляющего сигнала. Результаты работы могут быть использованы при разработке аппаратов электростимуляции с биоуправлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Системы комплексной электромагнитотерапии*: учебное пособие для вузов; под редакцией А.М. Беркутова, В.И. Жулева, Г.А. Кураева, Е.М. Прошина. – Москва: Лаборатория Базовых знаний, 2000. – 376 с.

2. Вовк, М.И. Биотехнические системы управления двигательными функциями человека / М.И. Вовк // Кибернетика и вычислительная техника. – 2017. – № 1 (187). – С. 49–66.

3. *Method of time-frequency analysis of compound electromyogram in estimation of neurogenic control efficiency in human skeletal muscles* / A. Osipov [et al.] // *Activitas Nervosa Superior Rediviva*. – 2015. – Vol. 57, № 4. – P. 101–107.

4. *Time-Frequency Analysis of Global Electromyogram in Qualitative and Quantitative Estimation of Human Neuromuscular System Functional Condition* / M. Mezhennaya [et al.] // *Biomedical electronics*. – 2012. – № 2. – P. 3–11.

5. *The therapy and diagnostic hardware-software complex of total electromyography and electrical stimulation* / M. Mezhennaya, A. Osipov, N. Davydova, M. Davydov // *Proceedings of Conference “Facilities of Medical Electronics and Novel Medical Technologies – MedElectronics-2014”*. – BSUIR. – 2014. – P. 268–272.

6. Осипов, А.Н. Спектральный анализ сигналов электростимуляции нервно-мышечной ткани / А.Н. Осипов, М.В. Давыдов // Доклады БГУИР. – 2005. – № 3 (11). – С. 53–58.

Поступила в редакцию 08.12.2021.

Информация об авторах

Осипов Анатолий Николаевич – к.т.н., доцент
Хазановский Игорь Олегович
Котов Дмитрий Анатольевич – к.т.н., доцент
Балтрукович Петр Иванович – к.т.н.