

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции, величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого мышцей

А.Н. Осипов¹, И.О. Хазановский², А.В. Пацев³, С.В. Пацев⁴

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

²ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь

³Республиканский центр медреабилитации и бальнеолечения,
ул. Макаёнка, 17, г. Минск 220114, Беларусь

⁴ООО «Клиника «Мерси»,
ул. Игнатенко, 8, г. Минск 220035, Беларусь

Поступила 27.02.2025

Принята к печати 06.05.2025

Важным моментом в процессе восстановительного лечения заболеваний нервно-мышечного аппарата является электростимуляция. Выбор частотно-временных параметров сигнала и его согласование с электрическими параметрами биологических тканей является одним из основных факторов в практике электростимуляции. Целью данной работы являлась оптимизация параметров электрического воздействия в соответствии с функциональным состоянием мышц. Исследования проводились на двуглавой мышце плеча верхней конечности испытуемого и включали исследование зависимости усилия, развиваемого мышцей, от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала и исследование фазочастотной характеристики межэлектродного импеданса двуглавой мышцы плеча верхней конечности испытуемых. Определена взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции, вызывающей максимальное усилие мышцы, и величины фазового сдвига фазочастотной характеристики тканей. Изучена зависимость усилия, развиваемого мышцей при электростимуляции, от величины амплитуды стимулирующего сигнала при различных значениях частоты электростимуляции. Установлено, что при увеличении амплитуды стимулирующего сигнала увеличивается частота экстремума фазочастотной характеристики биоткани, а соответственно и увеличивается частота электростимуляции, вызывающая максимальное усилие мышц. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем электростимуляции опорно-двигательного аппарата с обратной связью.

Ключевые слова: частота электростимуляции, амплитуда стимулирующего сигнала, величина фазового сдвига, фазочастотная характеристика биоткани

Адрес для переписки:

Хазановский И.О.
ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Address for correspondence:

Khazanovsky I.O.
Gorneletronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Для цитирования:

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, А.В. Пацев, С.В. Пацев.
Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции,
величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого
мышцей.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 168–174.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

For citation:

Osipov AN, Khazanovsky IO, Pancev AV, Pancev SV.
Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal
Value of the and the Magnitude of the Maximum Phase Shift,
and the Force Developed by the Muscle.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):168–174. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal Value and the Magnitude of the Maximum Phase Shift, and the Force Developed by the Muscle

A.N. Osipov¹, I.O. Khazanovsky², A.V. Pancev³, S.V. Pancev⁴

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus

²Gornelektronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,

³Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy,
Makayonka str., 17, Minsk 220114, Belarus,

⁴"Clinic "Mercy" LLC,
Ignatenko str., 8, Minsk 220035, Belarus

Received 27.02.2025

Accepted for publication 06.05.2025

Abstract

Electrical stimulation restorative treatment's process of neuromuscular system's diseases very important. Choice of the signal frequency-time parameters and its coordination with the biological tissues electrical parameters one of the main factors in the practice of electrical stimulation. The purpose of this article was to optimize the electrical action parameters in accordance with the muscles's functional state. The studies were conducted on the biceps brachii of the upper limb of the subject and included: study of dependence of the effort developed by the muscle on the amplitude of the stimulating signal's voltage and study of the interelectrode impedance phase-frequency characteristic of the upper limb biceps brachii of the subjects. As a result, relationship between the optimal value of the electrical stimulation frequency causing the maximum effort of the muscle and the magnitude of the phase shift of the phase-frequency characteristic of the tissues was determined. Dependence of the effort developed by the muscle during electrical stimulation on the amplitude of the stimulating signal magnitude at different values of electrical stimulation frequency was studied. It was established that with an increase of the stimulating signal amplitude, frequency of the phase-frequency characteristic's extremum of the biotissue increases and accordingly the frequency of electrical stimulation that causes maximum muscle effort increases. Results of the work can be used in the design of electrical stimulation systems for musculoskeletal system with feedback.

Keywords: electrical stimulation frequency, stimulation signal amplitude, phase shift magnitude, phase-frequency characteristic of biological tissue

Адрес для переписки:

Хазановский И.О.
ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Address for correspondence:

Khazanovsky I.O.
Gornelektronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Для цитирования:

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, А.В. Пачеев, С.В. Пачеев.
Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции,
величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого
мышцей.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 168–174.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

For citation:

Osipov AN, Khazanovsky IO, Pancev AV, Pancev SV.
Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal
Value of the and the Magnitude of the Maximum Phase Shift,
and the Force Developed by the Muscle.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):168–174. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Введение

Важное значение в ходе восстановительного лечения повреждений и заболеваний нервно-мышечной системы, вызывающих ограничения в движении в связи со снижением силы мышц и их дальнейшей гипотрофии, имеет электростимуляция [1, 2]. Традиционные методы электростимуляции токами различной формы (диадинамические, синусоидальные, модулированные и др.) не решают задачу реабилитации в целом. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение систем электростимуляции с обратной связью. Суть данного решения заключается в сочетании некоторых компонентов лечебной и диагностической аппаратуры, позволяющих в режиме реального времени в ходе электростимуляции осуществлять контроль отдельных физиологических параметров, на основе которых вырабатывается соответствующее терапевтическое воздействие [3]. Важным аспектом является выбор параметров стимулирующего воздействия (частота, форма, амплитуда, длительность воздействия и др.), которое должно осуществляться в соответствии с функциональным состоянием мышц, а также с его изменением в процессе проведения электростимуляции и реализовывать избирательное воздействие на отдельные участки мышцы [4]. В [5, 6, 7] отмечается, что дальнейшее развитие в данной области должно быть направлено на оптимизацию параметров стимуляции, согласованных с физиологическими и электрическими характеристиками стимулируемых тканей. Так, в работах [8, 9, 10] приведены результаты исследований влияния ширины и амплитуды стимулирующих импульсов на эффективность лечения различных заболеваний, показано, что частотно-временные параметры стимулирующих сигналов существенно влияют на область их эффективного применения. Таким образом, выбор частотно-временных параметров сигнала и его согласование с электрическими параметрами биологических тканей является одним из основных в практике электростимуляции.

Однако основная задача оптимизации электрического воздействия состоит не только в выявлении зависимостей функционального состояния организма и его реакций от различных параметров воздействующего фактора,

но и в реализации на их основе алгоритмов управления параметрами воздействия. Известны результаты исследований [11], в которых представлена математическая модель реакции нейронных структур в ответ на электростимуляцию (ЭС) и показана возможность определения оптимальных параметров ЭС, впоследствии реализованных в медицинской аппаратуре транскраниальной электростимуляции. В работе [12] представлена методика нахождения оптимальной по энергетическому критерию частоты электростимуляции, основанная на анализе импедансных параметров стимулируемой ткани. Представлены исследования взаимосвязи фазочастотной характеристики и оптимальной по энергетическому критерию частоты несущей стимулирующего сигнала. В результате установлена связь между оптимальной несущей частотой сигнала и частотой минимума фазочастотной характеристики ФЧХ (общее сопротивление тканей). Оптимальная частота больше частоты минимума ФЧХ в $2,86 \pm 0,65$ раза. Известны результаты исследований взаимосвязи между силой, развиваемой мышцей, и полосой преобладающих частот и средней частотой, возбуждающих её электрических потенциалов. На основании полученной зависимости предложен метод синтеза сигналов электростимуляции [4].

Тем не менее научно обоснованная технология оптимизации параметров воздействия в соответствии с текущими характеристиками биообъекта является перспективным направлением создания медицинской техники и требует дальнейшего развития. В связи с этим в данной статье исследуются вопросы управления усилием мышечных групп, вызываемым ЭС, посредством изменения амплитуды и частоты стимула на основе ФЧХ биотканей.

Модель и алгоритм исследования

Исследования проводились с помощью экспериментального комплекса, модель которого представлена на рисунке 1.

В ходе исследований испытуемый располагался в положении сидя, верхняя конечность согнута в локтевом суставе и лежит на горизонтальной поверхности, кисть расположена вне опорной плоскости. К кисти испытуемого закреплён динамометр, который ответной частью зафиксирован на поверхности пола.

Исследования проводились на двуглавой мышце плеча верхней конечности испытуемого. Стимулирующий ток подавался через электроды, наложенные на двигательную точку мышцы.

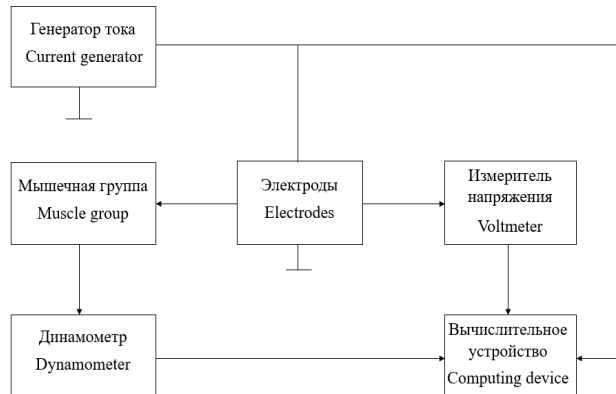


Рисунок 1 – Стенд для проведения исследований

Figure 1 – Research stand

На первом этапе выполнено исследование зависимости усилия, развиваемого мышцей, от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала. Процедура ЭС проводилась путём воздействия на мышцу сгенерированным сигналом, подаваемым на электроды. Напряжение изменялось в диапазоне от 60 В до значения,

при котором измеряемое усилие мышцы, вызванное ЭС, не возрастало. При проведении исследований пороговое значение амплитуды напряжения не превышало 90 В. Форма сигнала стимула соответствовала синусоидальной, а частота электростимуляции F – 0,5 кГц, 0,8 кГц, 2,5 кГц, 3,5 кГц, 5 кГц.

На втором этапе проведены исследования ФЧХ межэлектродного импеданса двуглавой мышцы плеча верхней конечности испытуемых. Регистрация ФЧХ выполнялась в соответствии со следующим алгоритмом. Сигнал тока синусоидальной формы подавался на электроды, с этих же электродов фиксировался сигнал напряжения. Сигналы напряжения и тока синхронно через двухканальный АЦП поступали в персональный компьютер. Фаза между током и напряжением вычислялась при переходе измеренных сигналов через нулевое значение. Для построения ФЧХ задающий сигнал изменялся от 20 Гц до 20 кГц. Амплитудное значение тока составляло 2 мА.

Результаты исследования

Зависимости усилия, развиваемого мышцей от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала представлены на рисунке 2.

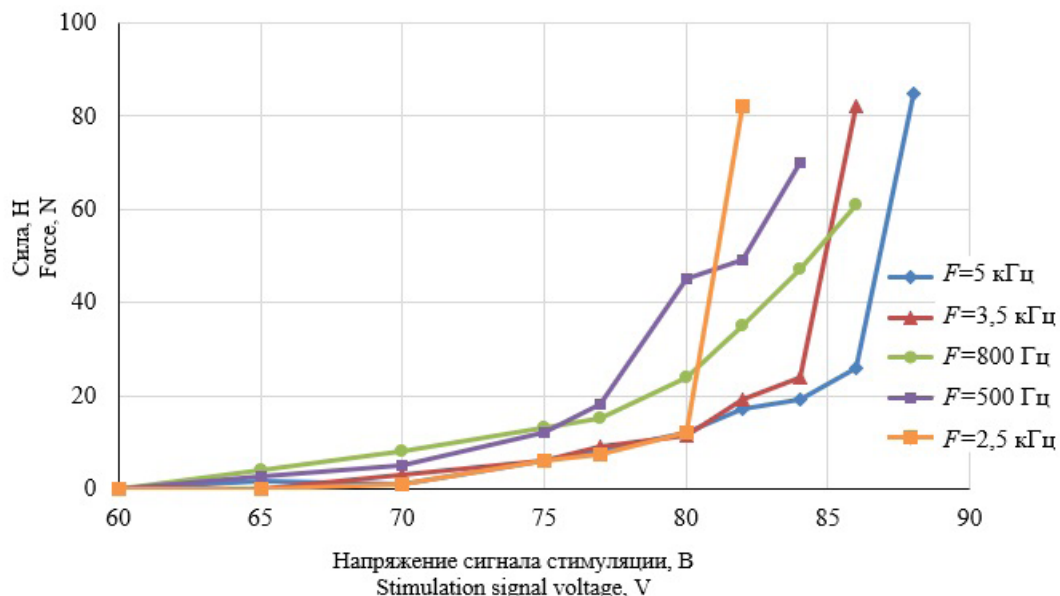


Рисунок 2 – Зависимость развиваемого мышцей усилия от величины амплитуды стимулирующего сигнала при различных значениях частоты электростимуляции F

Figure 2 – Dependence of the effort developed by the muscle on the amplitude of the stimulating signal at different values of the frequency of electrical stimulation F

Как видно из рисунка 2 зависимости носят экспоненциальный характер. Однако следует отметить, что в диапазоне сигналов до 75 В зависимости имеют линейную структуру. Это диапазон соответствует диапазону, используемому, как правило, в практической миостимуляции (менее 80 % от порогового значения напряжения). Диапазон свыше 75 В характеризуется высокой степенью нелинейности. Как следует из рисунка максимальное усилие, развиваемое мышцей, зависит не только от напряжения сигнала, но и от частоты стимуляции. Так, при амплитуде напряжения 77 В максимальное усилие получено на частоте 500 Гц, а при амплитуде напряжения 82 В – на частоте 2,5 кГц.

На рисунке 3 представлены результаты максимальных значений усилий мышцы для исследуемых частот.

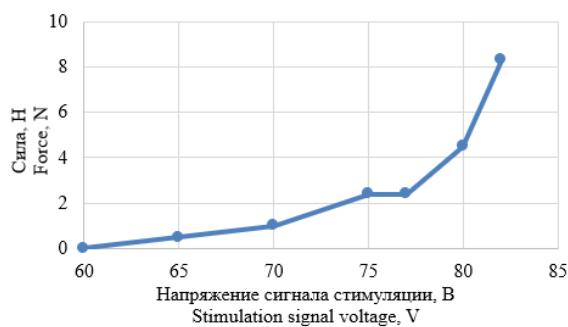


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения мышечного усилия от величины напряжения электростимуляции

Figure 3 – Dependence of the maximum value of muscle effort on the magnitude of electrical stimulation voltage

Как видно из рисунка 3 зависимость имеет линейный характер в основном диапазоне электростимуляции, что показано на рисунке пунктирной линией.

Таким образом, при ЭС опорно-двигательного аппарата изменение мышечного усилия может быть достигнуто не только посредством изменения амплитуды стимулирующего сигнала, но и за счёт изменения значения его частоты.

На рисунке 4 приведены зависимости, позволяющие определить наилучшую частоту стимула, соответствующую амплитуде напряжения стимуляции. Наилучшей считается частота, при которой усилие, развиваемое мышцей, является максимальным для данной амплитуды напряжения.



Рисунок 4 – Зависимость значения наилучшей частоты электростимуляции от амплитуды стимулирующего сигнала

Figure 4 – Dependence of the value of the best electrical stimulation frequency on the amplitude of the stimulating signal

Известно, что ФЧХ биотканей имеют экстремум [1, 2]. Причём значение частоты экстремума зависит от значения тока, при котором проводились исследования. В результате проведённых исследований установлено, что зависимость частоты максимума (экстремума) ФЧХ биоткани от уровня стимулирующего сигнала (рисунок 5) имеет характер, аналогичный зависимости наилучшей частоты электростимуляции от амплитуды стимулирующего сигнала (практически совпадает, рисунок 4).

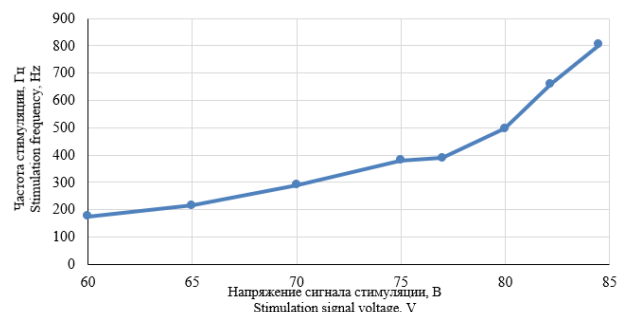


Рисунок 5 – Зависимость частоты максимума фазо-частотной характеристики биоткани от величины стимулирующего сигнала

Figure 5 – Dependence of the frequency of the maximum phase-frequency characteristic of biological tissue on the magnitude of the stimulating signal

На основании сравнения характеристик, представленных на рисунках 4 и 5, построена зависимость наилучшей частоты электростимуляции от частоты, соответствующей экстремуму ФЧХ биоткани (рисунок 6). Измерение ФЧХ является простой технической задачей, не требует длительного времени и может быть осуществлено перед процедурой

электростимуляции. Таким образом, данная характеристика может быть использована для управления частотой ЭС при подаче изменяемого по амплитуде стимулирующего сигнала.

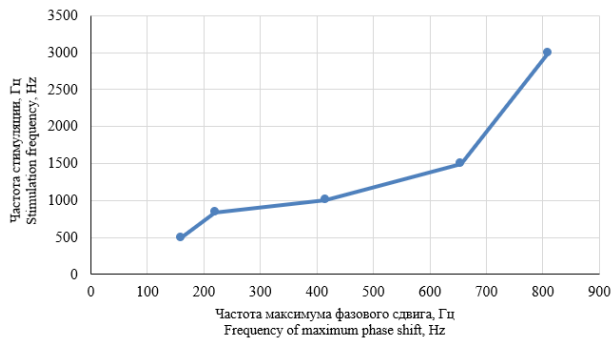


Рисунок 6 – Зависимость значений наилучшей частоты электростимуляции от частоты, соответствующей экстремуму фазочастотной характеристики биоткани

Figure 6 – Dependence of the values of the best frequency of electrical stimulation on the frequency corresponding to the maximum of the phase-frequency characteristic of biological tissue

Как видно из рисунка 6, наблюдается линейная зависимость между наилучшей частотой электростимуляции, соответствующей экстремуму ФЧХ биоткани, и частотой электростимуляции, соответствующей максимуму развиваемого мышцей усилия.

Заключение

Установлено, что при увеличении амплитуды стимулирующего сигнала увеличивается частота сигнала, соответствующая максимально развиваемому усилию. Аналогично при росте амплитуды стимулирующего сигнала растёт частота, соответствующая максимуму (экстремуму) фазочастотной характеристики стимулируемых мышечных групп. Для порогового режима электростимуляции частота экстремума фазочастотной характеристики биоткани составляет не более 25 % от наилучшей частоты стимулирующего сигнала. В связи с этим, в случае симуляции движения конечностей посредством стимуляции опорно-двигательного аппарата изменение усилия мышечных групп должно обеспечиваться не только изменением амплитуды сигнала стимуляции, но и изменением его частоты. Изменение частоты стимуляции осуществляется на основа-

нии зависимости изменения частоты экстремума фазочастотной характеристики от амплитуды сигнала, при котором проводились измерения. Данный результат может быть использован при проектировании систем электростимуляции опорно-двигательного аппарата.

Список использованных источников

1. Гурьянова У.А. Функциональная электростимуляция при восстановлении ходьбы после инсульта. / У.А. Гурьянова, В.В. Ковальчук, О.А. Тихоплав, Ф.Г. Литвак // Обзор литературы. Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. – 2020. – Т. 2. – № 3. – С. 244-262.
DOI: 10/36425/rehab34831
2. Moineau B., Marquez-Chin C., Alizadeh-Meghraz M., [et al.] Garments for functional electrical stimulation: design and proofs of concept. J. Rehabil. Assist. Technol. Eng. 2019,6:205566831985434.
DOI: 10.1177/2055668319854340
3. Вовк М.И. Биотехнические системы управления двигательными функциями человека. / М.И. Вовк // Кибернетика и вычислительная техника. Киев. – 2017. – Т. 187. – № 1. – С. 49-66.
4. Осипов А.Н. Синтез сигналов электро-стимуляции на основе частотно-временного анализа электромиограмм. / А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, Д.А. Котов, П.И. Балтрукович // Проблемы физики, математики и техники. Гомель. – 2022. – Т. 50. – № 1. – С. 33-36.
5. Голдырев Е.О., Функциональная электростимуляция в комбинации с фармакотерапией в нейрореабилитации при церебральных ишемиях и болевых синдромах. / Е.О. Голдырев, Л.Р. Ахмадеева, Э.М. Харисова // Эффективная фармакотерапия. – 2024. – Т. 20. – № 34. – С. 44–49.
DOI: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-44-49
6. Jovanovic L.I., Kapadia N., Zivanovic V. [et al.] Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. Spinal Cord Series and Cases. 2021;7(24).
DOI: 10.1038/s41394-020-00380-4
7. Osuagwu B.C.A., Wallace L., Fraser M., [et al.] Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomized pilot study. Journal of Neural Engineering. 2016;13(6):065002.
DOI: 10.1088/1741-2560/13/6/065002
8. Arpin DJ, Ugiliweneza B, Forrest G, Harkema SJ and Rejc E (2019) Optimizing Neuromuscular Electrical Stimulation Pulse Width and Amplitude to Promote

Central Activation in Individuals With Severe Spinal Cord Injury. *Front. Physiol.* 10:1310.

DOI: 10.3389/fphys.2019.01310

9. Глушук С.Ф. Адаптивные электростимуляторы желудочно-кишечного тракта / С.Ф. Глушук, Я.С. Пеккер // Известия томского политехнического университета. – Т. 308. – № 4. – С. 164–166.

10. Arpin D.J., Forrest G., Harkema S.J., Rejc E. (2018). Submaximal marker for investigating peak muscle torque using neuromuscular electrical stimulation after paralysis. *J. Neurotrauma.* 36,930–936.

DOI: 10.1089/neu.2018.5848

11. Малыгин А.В. Определение оптимальных параметров транскраниальной электростимуляции на основе математической модели нейронных структур. / А.В. Малыгин // Медицинские компьютерные технологии. – 2009. – № 5. – С. 25–32.

12. Электронная аппаратура для стимуляции органов и тканей / Под редакцией Р.И. Утямышева и М. Враны – М.: Энергоатомиздат, 2000. – С. 384.

References

1. Guryanova UA, Kovalchuk VV, Tikhoplav OA, Litvak FG. Functional electrical stimulation in gait recovery after stroke. Literature review. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2020;2(3):244-262.

DOI: 10/36425/rehab34831

2. Moineau B, Marquez-Chin C, Alizadeh-Meghrizi M. [et al.] Garments for functional electrical stimulation: design and proofs of concept. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.* 2019,6:205566831985434.

DOI: 10.1177/2055668319854340

3. Vovk MI. Biotechnical systems for controlling human motor functions. *Cybernetics and computing engineering.* Kyiv. 2017;1(187):49-66.

4. Osipov AN, Khazanovsky IO, Kotov DA, Baltrukovich PI. Synthesis of electrical stimulation signals based on time-frequency analysis of electromyograms.

Problems of Physics, Mathematics and Technology. Gomel. 2022;1(50):33-36.

5. Goldyrev EO, Akhmadeeva LR, Kharisova EM. Functional electrical stimulation in combination with pharmacotherapy in neurorehabilitation of cerebral ischemia and pain syndromes. *Effective pharmacotherapy.* 2024;20(34):44-49.

DOI: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-44-49

6. Jovanovic LI, Kapadia N, Zivanovic V. [et al.] Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. *Spinal Cord Series and Cases.* 2021;7(24).

DOI: 10.1038/s41394-020-00380-4

7. Osuagwu BCA, Wallace L, Fraser M. [et al.] Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomized pilot study. *Journal of Neural Engineering.* 2016;13(6):065002.

DOI: 10.1088/1741-2560/13/6/065002

8. Arpin DJ, Ugiliweneza B, Forrest G, Harkema SJ and Rejc E. Optimizing Neuromuscular Electrical Stimulation Pulse Width and Amplitude to Promote Central Activation in Individuals With Severe Spinal Cord Injury. *Front. Physiol.* 2019;10:1310. **DOI:** 10.3389/fphys.2019.01310

9. Glushchuk SF, Pekker YaS. Adaptive electrical stimulators of the gastrointestinal tract. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University.* 308(4):164-166.

10. Arpin DJ, Forrest G, Harkema SJ, and Rejc E. Submaximal marker for investigating peak muscle torque using neuromuscular electrical stimulation after paralysis. *J. Neurotrauma.* 2018;36,930-936.

DOI: 10.1089/neu.2018.5848

11. Malygin AV. Determination of optimal parameters of transcranial electrical stimulation based on a mathematical model of neural structures, *Medical Computer Technologies,* 2009;5:25-32.

12. Electronic equipment for stimulation of organs and tissues / Edited by R.I. Utyamyshev and M. Vrana. Moscow: Energoatomizdat. 2000, p. 384.