



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-3-75-81>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.847

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ МЫШЦ СПИНЫ ПРИ ЛЕЧЕНИИ СКОЛИОЗА

Т. С. ВОРОНЦОВА¹, М. В. ДАВЫДОВ²

¹Республиканский научно-практический центр «Мать и дитя» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В статье представлена трехмерная модель тканей спины человека в программных пакетах ZBrush и SolidWorks. Выполнено моделирование позвоночного столба с изгибом, мышц, жировой ткани и кожных покровов. С использованием среды COMSOL Multiphysics смоделированы воздействия электростимуляции на биологические объекты, определены характеристики. При моделировании в свойствах каждой биологической ткани задавались значения удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости, были настроены электроды, создана сетка для разбиения моделей на меньшие части и элементы, настраивалась необходимая частота. Для верификации результатов моделирования проводили исследование на пациенте, расчет и анализ полученных результатов. Разработанные модели могут применяться в клинической медицине для определения силы стимулирующего тока и задания параметров электростимуляции. При построении модели можно изменять толщину жировой ткани, кожи, размеры мышц и костей, менять размеры электродов и тем самым подбирать наиболее оптимальные параметры для проведения электростимуляции. Модели могут применяться при разработке эффективной методики электростимуляции и схемы наложения электродов для определенного вида сколиоза.

Ключевые слова: электростимуляция, моделирование, программное вычисление, модель спины.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Воронцова, Т. С. Модель электростимуляции мышц спины при лечении сколиоза / Т. С. Воронцова, М. В. Давыдов // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 3. С. 75–81. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-3-75-81>.

MODEL OF ELECTRICAL STIMULATION OF BACK MUSCLES IN THE TREATMENT OF SCOLIOSIS

TATIANA S. VORONTSOVA¹, MAKSIM V. DAVYDOV²

¹Republican Scientific and Practical Center “Mother and Child” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.05.2023

Abstract. The article presents a three-dimensional model of the tissues of the human back in the ZBrush and SolidWorks software packages. Modeling of the spinal column with a bend, muscles, adipose tissue and skin was performed. Using the COMSOL Multiphysics environment, the effects of electrical stimulation on biological objects are modeled, and characteristics are determined. When modeling, in the properties of each biological tissue, the values of electrical conductivity and relative permittivity were set, the electrodes were adjusted, a grid was created to divide the models into smaller parts and elements, and the required frequency was adjusted. To verify the simulation results, a study was carried out on the patient, the calculation and analysis of the results obtained.

The developed models can be used in clinical medicine to determine the strength of the stimulating current and set the parameters of electrical stimulation. When building a model, one can change the thickness of adipose tissue, skin, muscle and bone sizes, change the size of the electrodes, and thereby select the most optimal parameters for electrical stimulation. Models can be used in the development of the most effective method of electrical stimulation and the scheme for applying electrodes for a certain type of scoliosis.

Keywords: electrical stimulation, modeling, software calculation, back model.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vorontsova T. S., Davydov M. V. (2023) Model of Electrical Stimulation of Back Muscles in the Treatment of Scoliosis. *Digital Transformation*. 29 (3), 75–81. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-3-75-81> (in Russian).

Введение

Современное развитие аппаратного и программного обеспечения делает возможным широкое внедрение цифровых технологий в практическую медицину. Цифровизация медицины позволяет существенно улучшить качество и эффективность здравоохранения, сократить расходы и улучшить доступность медицинской помощи. Одним из возможных путей информатизации лечебного процесса, наряду с телемедициной, анализом больших данных, созданием приложений с использованием виртуальной и дополненной реальности, является разработка цифровых двойников для лечения человека – создание виртуальной модели организма пациента на основе его медицинских данных. Цифровой двойник представляет собой цифровую модель физического тела пациента, включая его анатомическую структуру, физические и физиологические характеристики и патологии. В статье представлено моделирование процесса электростимуляции для индивидуализированного выбора параметров физиотерапевтических процедур при лечении сколиоза.

Сколиоз – сложная трехплоскостная деформация позвоночника, характеризующаяся в первую очередь искривлением его во фронтальной плоскости с последующей торсией и искривлением в сагиттальной плоскости, а именно – увеличением физиологических изгибов (грудного кифоза и шейного лордоза). При сколиозе развивается мышечный дисбаланс, что приводит к нарушению функционирования внутренних органов и систем. Для коррекции мышечного дисбаланса у детей с нарушением осанки и при сколиозе I и II степеней применяется электростимуляция. Она позволяет устранить рефлекторно-сегментарные изменения, сформировать правильный мышечный корсет, что способствует устранению нарушения осанки у данной категории детей, предотвращает развитие сколиоза или уменьшает его степень.

Цель исследований авторов статьи – рассмотреть виды сколиоза, мышцы, задействованные в образовании искривления позвоночника, характеристики стимулирующих сигналов, а также разработать трехмерную модель спины с проведением симуляции электростимуляции в программных пакетах ZBrush, SolidWorks и COMSOL Multiphysics. Разработаны оптимальная методика электростимуляции и схема наложения электродов при определенном виде сколиоза, смоделировано воздействие электростимуляции на биологические объекты. Проведены исследования на пациенте с программным вычислением характеристик.

Процессы моделирования

Исследование проводилось в три этапа. Первый – изучение видов, методов корректировки сколиоза, способов наложения электродов при выполнении процедуры электростимуляции. В статье рассмотрен сколиоз с ведущей дугой в грудном отделе. Этот тип сколиоза – один из наиболее частых и злокачественных из-за быстрого прогрессирования и грубых деформаций грудной клетки, сопровождающихся значительными нарушениями функций дыхательной и сердечно-сосудистой систем. При прогрессировании процесса увеличивается угол искривления в грудном отделе, усиливаются болевой синдром и внешний косметический дефект, нарушается работа внутренних органов. Клинико-рентгенологическая классификация С-образного сколиоза такова:

I степень – слабо выраженное искривление позвоночника во фронтальной плоскости, исчезающее в горизонтальном положении. Наблюдается асимметрия надплечий и лопаток. Угол сколиотической дуги 175° – 170° (5° – 10°);

II степень – более заметно искривление позвоночника во фронтальной плоскости, намечается рёберный горб. Деформация частично фиксирована и полностью не исчезает при разгрузке позвоночника. Намечаются признаки компенсаторной дуги. Угол искривления составляет 170° – 155° (10° – 25°);

III степень – значительная сколиотическая деформация позвоночника с выраженной деформацией грудной клетки и большим рёберным горбом. Туловище отклонено в сторону основной дуги сколиоза. Коррекция позвоночника при разгрузке незначительная. Угол сколиотической дуги 155° – 135° (25° – 45°);

IV степень – угол сколиотической дуги 135° – 105° (45° – 75°).

Основным методом лечения сколиоза III и IV степеней считается операция. Электростимуляция, как один из методов физиотерапевтических процедур, наиболее приемлема для I и II степеней сколиоза. Цель электростимуляции:

- растянутые и слабые мышцы, расположенные на стороне вершины искривления, необходимо тонизировать и укреплять, способствуя их укорочению;
- укороченные мышцы в гипертонусе на стороне вогнутости следует расслаблять и растягивать.

Электростимуляцию при грудном сколиозе нужно проводить на средней и нижней трапециевидных мышцах, также можно задействовать большую ромбовидную мышцу, находящуюся под трапециевидной. Для электростимуляции при грудном правостороннем сколиозе электроды следует размещать в два этапа:

I – для тонизирования и укрепления растянутых мышц – слева, вдоль позвоночного столба на нижней трапециевидной мышце;

II – для расслабления укороченных мышц – справа, на стороне вогнутости вдоль позвоночного столба на нижней трапециевидной мышце [1–4].

На основе анализа медицинских методик для лечения сколиоза разрабатывали гетерогенную модель тканей спины с возможностью моделирования протекания стимулирующих токов.

Создание 3D-модели тканей спины

Моделирование спины человека начинали с конструирования позвоночного столба с изгибом, мышц, жировой ткани и кожи. Электроды располагались по схеме, приведенной на рис. 1.

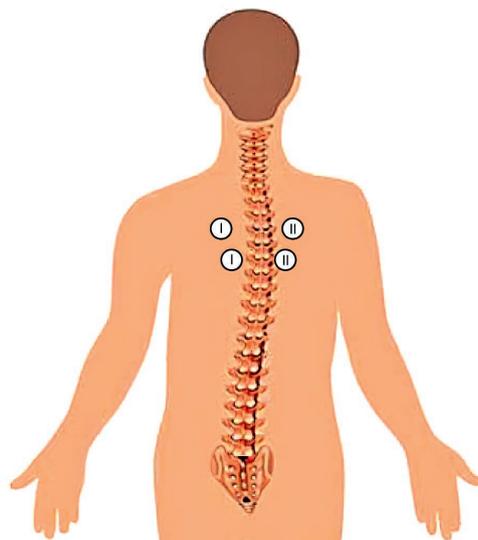


Рис. 1. Этапы размещения электродов
Fig. 1. Stages of electrodes placement

Далее проводили моделирование и симуляцию электростимуляции в программных пакетах ZBrush, SolidWorks, COMSOL Multiphysics. Моделирование – один из эффективных методов изучения различных воздействий на тело человека. Спину с электродами моделировали в программах ZBrush и SolidWorks (рис. 2).

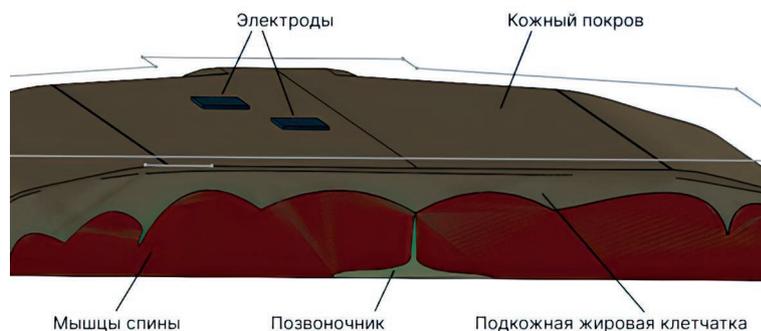


Рис. 2. Общий вид модели в программе SolidWorks тканей спины с размещением электродов
Fig. 2. General view of the model in the SolidWorks program of back tissues with placement of electrodes

Для моделирования воздействия электростимуляции на биологические объекты и проведения программного вычисления характеристик использовали COMSOL Multiphysics. При этом решались такие задачи, как задание физических свойств сред, граничных и других условий модели. Результаты анализировали с помощью средств цветной графики (рис. 3).

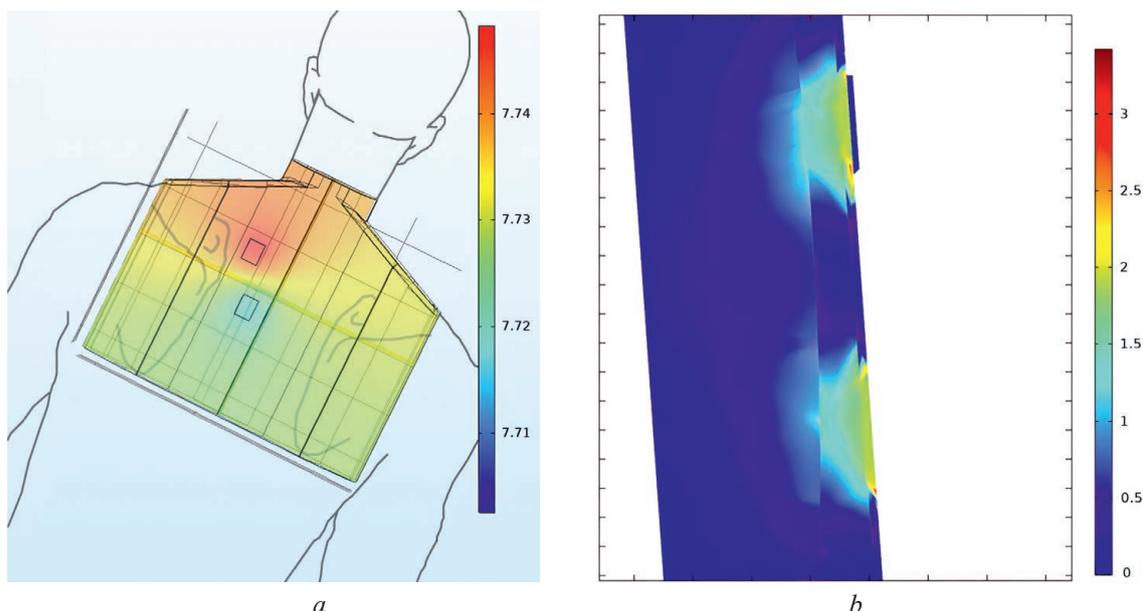


Рис. 3. Моделирование в COMSOL Multiphysics:
a – электростимуляция; *b* – распределение плотности тока под электродами в разрезе
Fig. 3. Simulation in COMSOL Multiphysics:
a – electrical stimulation; *b* – current density distribution under the electrodes in the section

При моделировании в свойствах каждого материала задавались значения удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости, были настроены электроды, создана сетка для разбиения моделей на меньшие части или элементы (по которым можно записать систему уравнений, описывающую решение главного уравнения), в настройках устанавливали необходимую частоту. Моделирование проводили на частотах от 500 до 5000 Гц (табл. 1).

Таблица 1. Свойства материалов на частоте 500 Гц
Table 1. Properties of materials at a frequency of 500 Hz

Материал / Material	Удельная электрическая проводимость, См/м / Electrical conductivity, S/m	Относительная диэлектрическая проницаемость / Relative permittivity
Кожа	2,01e-4	1,14e+3
Кость	8,13e-2	2,23e+2
Жир	4,11e-2	3,31e+4
Мышцы	3,10e-1	1,09e+6

Верификация результатов моделирования

Следующий этап работы – проведение исследования на пациенте. Вид установки для выполнения этого эксперимента изображен на рис. 4.



Рис. 4. Установка для проведения исследования:
a – прибор электростимуляции; *b* – электроды размерами 2,5×1,0 см
Fig. 4. Installation for conducting research:
a – electrical stimulation device; *b* – electrodes measuring 2.5×1.0 cm

Методика проведения электростимуляции мышц спины включала следующие этапы:

- 1) подготовку к проведению исследования;
- 2) нанесение на электроды или прокладки состава, повышающего электропроводимость;
- 3) размещение на теле пациента электродов с фиксирующими лентами (рис. 5);

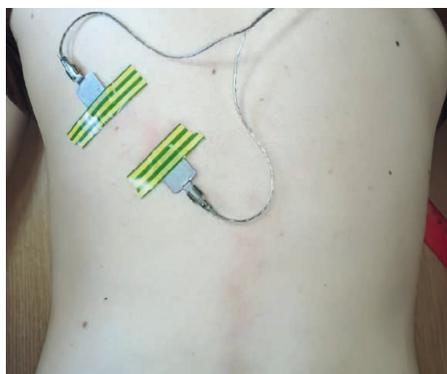


Рис. 5. Размещение электродов
Fig. 5. Placement of electrodes

4) проведение электростимуляции мышц (при напряжении 15 В и частоте от 500 до 5000 Гц) путем плавного регулирования подаваемого напряжения с одновременным контролем параметров стимулирующего сигнала на осциллографе и ощущений пациента;

5) по истечении времени воздействия – снятие электродов, проверка состояния пациента; при необходимости участок кожи, находившийся под воздействием электрического тока, обрабатывался увлажняющими средствами.

В ходе экспериментов задавали те же параметры напряжения и частоты, что при проведении моделирования в среде COMSOL Multiphysics.

Результаты исследований и их обсуждение

Характеристики сигналов при электростимуляции мышц фиксировались на осциллографе и в дальнейшем учитывались при расчете и анализе параметров (табл. 2).

Сравнение показателей электростимуляции при моделировании в COMSOL Multiphysics и экспериментальном исследовании представлено на рис. 6. На графиках в процентах отмечены отклонения значений.

Таблица 2. Распределение тока при электростимуляции
Table 2. Current distribution during electrical stimulation

Частота, Гц / Frequency, Hz	Сила тока, А / Current strength, A			Отклонение, % / Deviation, %
	Электростимуляция при / Electrical stimulation at		Разница токов / Current difference	
	моделировании в COMSOL Multiphysics / modeling in COMSOL Multiphysics	экспериментальном исследовании / experimental study		
500	0,0210	0,0199	0,00110	5,23
1000	0,0240	0,0235	0,00050	2,08
1024	0,0260	0,0253	0,00060	2,69
2000	0,0270	0,0268	0,00020	0,74
2500	0,0300	0,0300	0	0
5000	0,0375	0,0373	0,00016	0,53

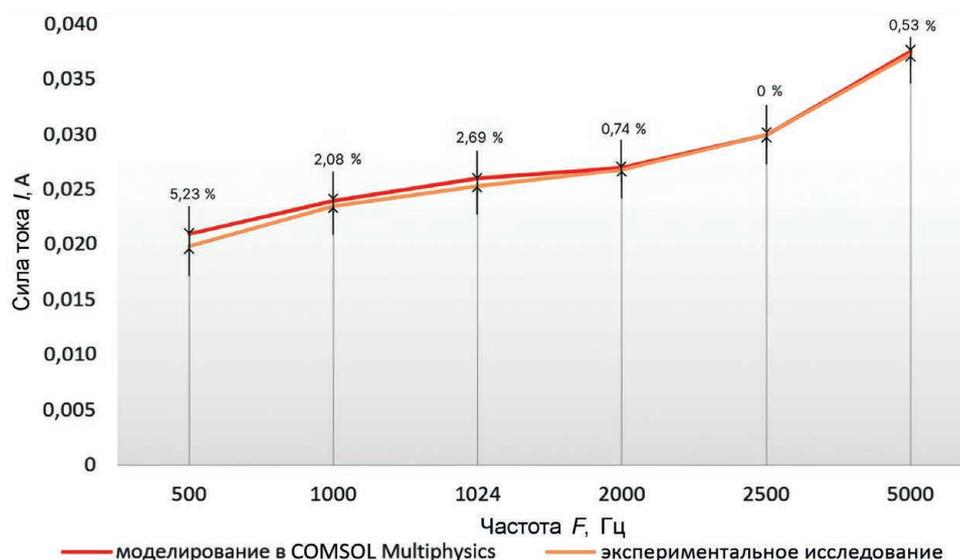


Рис. 6. Сравнение показателей электростимуляции при моделировании в COMSOL Multiphysics и экспериментальном исследовании

Fig. 6. Comparison of electrical stimulation performance in COMSOL Multiphysics simulation and experimental study

Согласно табл. 2 и рис. 6, результаты, полученные при проведении процедуры электростимуляции и при симуляции в COMSOL Multiphysics, имеют незначительную разницу: для тока – от 0 до 1,1 мА, для отклонения – от 0 до 5,23 %.

Заключение

1. Разработана трехмерная модель спины со сколиозом, смоделировано воздействие электростимуляции на биологические объекты, выполнен анализ полученных результатов.

2. Разработанные модели могут найти применение в клинической медицине для определения силы стимулирующего тока и задания параметров частоты и напряжения при электростимуляции, а также для наглядного представления, как ток распространяется по стимулируемым зонам. При построении модели можно изменять толщину жировой ткани, кожи, размеры мышц и костей, менять размеры электродов и тем самым подбирать наиболее оптимальные параметры для проведения электростимуляции. Модели могут применяться при разработке наиболее эффективной методики электростимуляции и схемы наложения электродов для определенного вида сколиоза.

Список литературы

1. Красикова, И. С. Сколиоз. Профилактика и лечение / И. С. Красикова. М.: Медицина, 2011. 192 с.
2. Котельников, Г. П. Травматология и ортопедия / Г. П. Котельников, С. П. Миронов, В. Ф. Мирошниченко. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. С. 400.
3. Гуляев, В. Ю. Электродиагностика, электростимуляция и импульсная низкочастотная электротерапия / В. Ю. Гуляев, В. А. Матвеев, И. Е. Оранский. Екатеринбург, 2004. 104 с.
4. Губенко, В. П. Мануальная терапия в вертеброневрологии / В. П. Губенко. Киев: Здоровье, 2003. 456 с.

References

1. Krasikova I. S. (2011) *Scoliosis. Prevention and Treatment*. Moscow, Medicine Publ. 192 (in Russian).
2. Kotelnikov G. P., Mironov S. P., Miroshnichenko V. F. (2016) *Traumatology and Orthopedics*. Moscow, GEOTAR-Media Publ. 400 (in Russian).
3. Gulyaev V. Y., Matveev V. A., Oransky I. E. (2004) *Electrodiagnostics, Electrostimulation and Pulsed Low-Frequency Electrotherapy*. Yekaterinburg. 104 (in Russian).
4. Gubenko V. P. (2003) *Manual Therapy in Vertebro neurology*. Kyiv, Zdorovyе Publ. 456 (in Russian).

Вклад авторов

Воронцова Т. С. создала 3D-модель тканей спины. Провела симуляцию электростимуляции в COMSOL Multiphysics и процедуру электростимуляции на пациенте. Произвела расчет и анализ полученных результатов. Выполнила построение графиков, подготовила рукопись статьи.

Давыдов М. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, сформировал основные технические требования к работе, проанализировал полученные результаты.

Authors' contribution

Vorontsova T. S. created a 3D model of back tissues. Conducted a simulation of electrostimulation in COMSOL Multiphysics and an electrostimulation procedure on a patient. Calculated and analyzed the results obtained. Completed the construction of graphs and prepared the manuscript of the article.

Davydov M. V. carried out the formulation of the task for the study, formed the main technical requirements for the work, analyzed the results obtained.

Сведения об авторах

Воронцова Т. С., инж. Республиканского научно-практического центра «Мать и дитя»

Давыдов М. В., к. т. н., доцент, первый проректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 378-42-51
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Давыдов Максим Викторович

Information about the authors

Vorontsova T. S., Engineer at the Republican Scientific and Practical Center "Mother and Child"

Davydov M. V., Cand. of Sci., Associate Professor, First Vice-Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 378-42-51
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Davydov Maksim Viktorovich