

МОДЕЛЬ МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРИ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Гладких А.П., Сакович М.С., Соловьев А.Я.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научные руководители: Камлач П.В. - к. т. н., доцент
Чураков А.В. - к. м. н., доцент*

Аннотация. В статье рассматривается компьютерное моделирование мышечной ткани человека. Исследование посвящено анализу процесса электростимуляции мышц. Модель включает мышечные волокна, фасцию и электроды. Разработка выполнена в программной среде Sim4Life. Мышечная ткань представлена в виде сетчатой структуры волокон. Фасция моделируется как слой с пониженной электропроводностью. Электроды выполнены из медицинской нержавеющей стали. Симуляция проводилась в режиме воздействия переменным током. Результаты показали неоднородность распределения электрического поля. Выявлено, что глубина эффективного воздействия ограничена поверхностными слоями.

Ключевые слова: мышцы, фасция, электростимуляция, компьютерная модель

Введение. Компьютерное моделирование тканей человека является критически важным и актуальным направлением в современной медицине, биологии и биоинженерии. Оно позволяет создавать виртуальные модели органов и систем, имитировать их функции, анализировать реакции на внешние воздействия и прогнозировать развитие заболеваний [1].

В рамках данного исследования разработана и проанализирована объемная геометрическая модель мышечного комплекса, включающего фасциальную оболочку и мышечные волокна, а также электроды для последующего анализа результатов воздействия электростимуляции. Построение модели и последующий вычислительный эксперимент выполнены в программной среде Sim4Life.

Основная часть. Процесс исследования воздействия тока на мышечную ткань с помощью моделирования включает в себя два ключевых этапа, последовательное выполнение которых обеспечивает целостность научного анализа. Первый этап посвящен разработке геометрической модели, максимально приближенной к реальной анатомии и физическим свойствам исследуемой ткани. На этой стадии происходит оцифровка анатомии и создание виртуального полигона для испытаний. Второй этап направлен на выявление закономерностей распределения тока и его влияния на каждую из указанных структур. Именно здесь, на основе созданной геометрии, проводятся расчеты электромагнитных полей, позволяющие не просто увидеть пути прохождения тока, но и дать прогноз относительно эффективности и безопасности стимуляции для каждого типа ткани в отдельности, что является конечной целью всего исследовательского процесса.

Мышечная ткань, выступающая главным объектом исследования, является ключевым элементом разработанной модели. Для максимально достоверной имитации ее электрофизиологических характеристик мышечные волокна представлены не сплошным массивом, а в виде сетчатой структуры, имитирующей пучки миофибрилл и межклеточное пространство. Именно мышечная ткань, обладающая высокой проводимостью в областях скопления волокон (по сравнению с жиром или костью), играет основную роль при электрическом воздействии, выступая в качестве проводника и основной мишени для стимуляции. Детализация структуры волокон (их ориентация и плотность) позволяет повысить точность моделирования распределения тока и его воздействия, давая возможность

количественно оценить, как электрическое поле взаимодействует с тканью на микроуровне и какие именно зоны мышцы деполяризуются в первую очередь.

Модель, разработанная в среде Sim4Life [2], представлена на рисунке 1. Визуально она представляет собой многослойную структуру, однако исследователи сознательно пошли на упрощение: кожный покров в модели отсутствует. Это решение продиктовано физическими свойствами тканей: кожа обладает высоким омическим сопротивлением и могла бы искажать картину прохождения тока, если бы мы изучали поверхностные эффекты. Но поскольку основной целью исследования является именно анализ электростимуляции мышечной ткани (глубинной структуры), исключение кожи позволяет «обнажить» объект изучения и направить все вычислительные мощности на точный расчет процессов, происходящих непосредственно в мышечных волокнах под воздействием приложенных электродов.

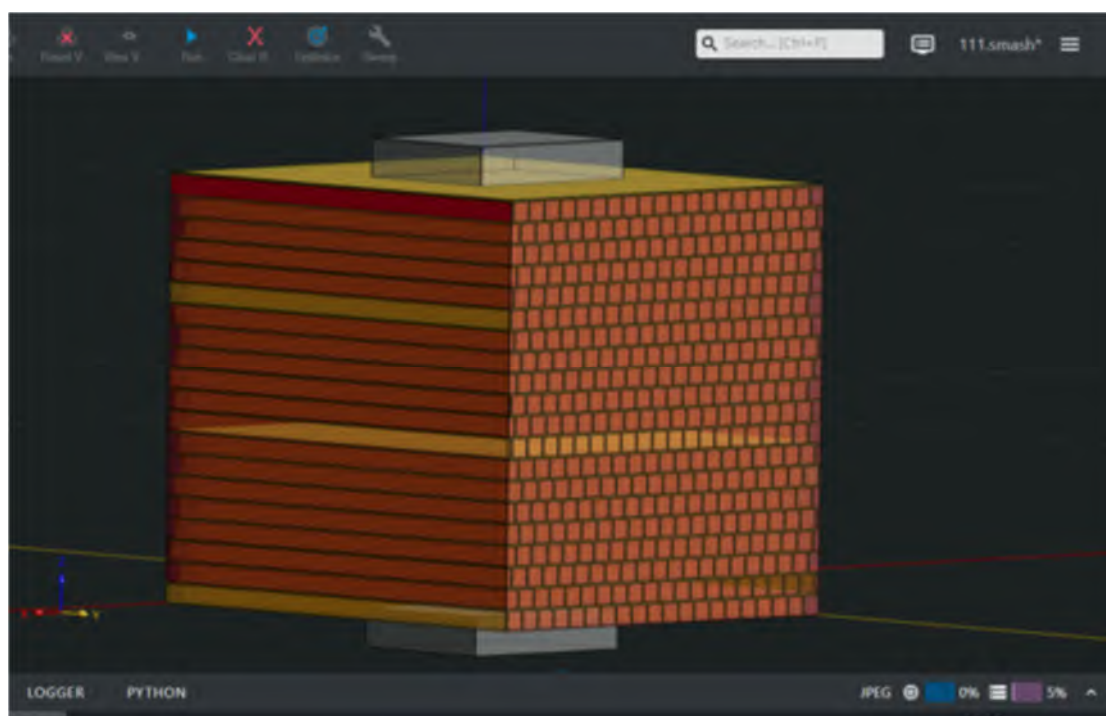


Рисунок 1 – Модель мышечной ткани в среде Sim4Life

Прослойкой между «блоками» мышечной ткани служит фасция, или же соединительная ткань. Введение этого элемента в модель принципиально важно для создания гетерогенной структуры, поскольку фасция, наряду с поддержкой мышечных структур, непосредственно влияет на распространение электрического тока. Ее электрофизиологические свойства заметно отличаются от мышечных: обладая меньшей проводимостью, чем мышцы, она, тем не менее, существенно влияет на распределение тока в областях, прилегающих к мышечным волокнам. Фасция работает как изолятор или ограничитель, создавая границы раздела сред, на которых происходит преломление силовых линий поля. Учет этого слоя позволяет модели избежать излишней идеализации и приблизить виртуальную картину воздействия к реальным процессам, происходящим в сложной архитектуре мягких тканей организма.

В качестве материала электродов была выбрана нержавеющая сталь. При построении виртуальной модели критически важно задавать корректные граничные условия, и выбор материала здесь не случаен. Нержавеющая сталь (прежде всего, медицинские марки 316L, 316LVM) является одним из наиболее изученных и широко применяемых материалов для стимулирующих электродов. Это подтверждается многолетними клиническими исследованиями, где такие электроды имплантировались сотнями и демонстрировали

стабильную работу [3]. Использование в симуляции параметров именно этого материала гарантирует, что результаты моделирования будут релевантны реальной клинической практике, а рассчитанные значения плотности тока и потенциалов на границе раздела «электрод-ткань» будут соответствовать поведению реальных имплантируемых систем.

Симуляция электростимулирующего воздействия проводилась также в среде Sim4Life. В качестве режима был выбран режим воздействия переменным током. Результаты симуляции представлены на рисунке 2.

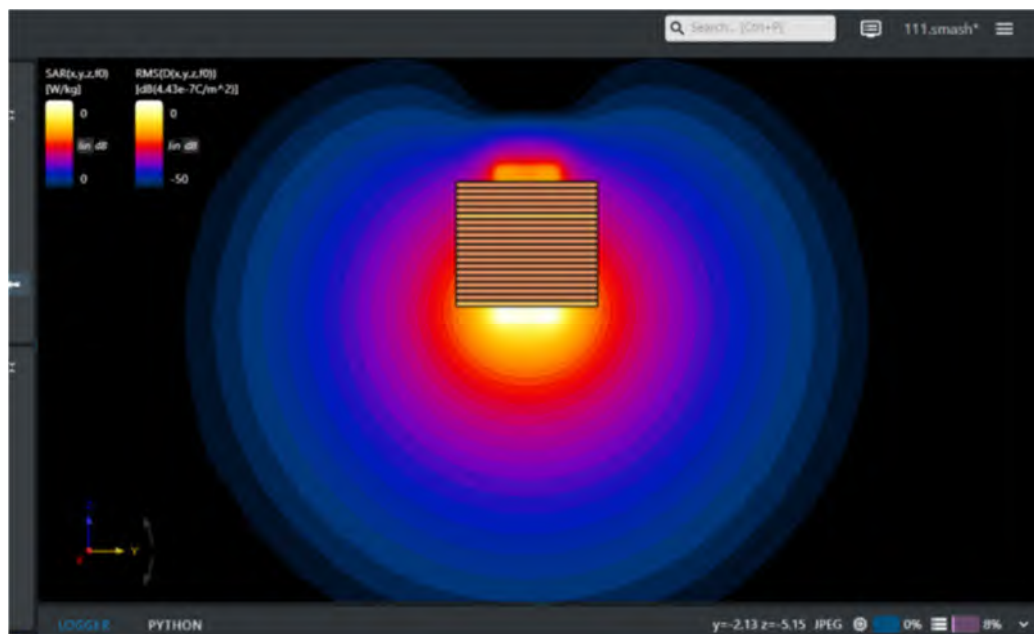


Рисунок 2 – Результат симуляции электростимуляции мышечной ткани в среде Sim4Life

Заключение. Значимость компьютерного моделирования в области исследования электростимуляции мышечных тканей трудно переоценить, особенно на этапе перехода от общих протоколов к персонализированной медицине. Созданная в среде Sim4Life модель, включающая фасцию и мышцы, выступает в роли цифрового полигона, где можно безопасно проводить эксперименты. Она позволяет детально визуализировать и количественно оценить распределение электрических полей в гетерогенной структуре тканей – увидеть, как влияет на ход тока наличие плотной соединительнотканной прослойки, которая часто выступает диэлектрическим барьером. Полученные данные подтверждают, что виртуальные эксперименты являются мощным инструментом для прогнозирования результатов физиотерапевтического воздействия: от подбора оптимальной частоты и силы тока до выбора места наложения электродов. Возможность заранее просчитать сценарий не только повышает эффективность терапии, но и служит целям минимизации рисков, связанных с индивидуальной чувствительностью или патологиями. Таким образом, моделирование становится фундаментом для перехода к персонализированным подходам в лечении, где каждый протокол стимуляции может быть адаптирован под уникальную анатомию и физиологию конкретного человека.

На основании результатов численного моделирования низкочастотного электровоздействия (0,1 Гц) на многослойную модель мышечной ткани установлено, что распределение удельного коэффициента поглощения (SAR) и плотности электрического смещения (D) характеризуется выраженной пространственной неоднородностью с преимущественной локализацией максимумов в зонах непосредственного контакта электродов. Градиентный анализ визуализированных полей подтверждает выраженное затухание интенсивности воздействия по направлению от периферии к центральным слоям.

Обнаруженное рассеивание поля за пределы геометрических границ мышечного блока в сочетании с характерным искажением изолиний на межслойных интерфейсах указывает на значительное влияние послойной структуры на формирование путей протекания тока, что в совокупности определяет преимущественное энерговыделение в приповерхностных структурах и ограничивает глубину эффективного терапевтического воздействия в квазистатическом режиме.

Список литературы

1. Лосенкова С.О., Погребняк А.В., Морозов Ю.А., Степанова Э.Ф. Компьютерное моделирование как один из современных методов прогнозирования в фармацевтической технологии // Фармация и фармакология. – 2014. – № 6 (7). – С. 105–112.
2. Sim4Life: The Premier Simulation Platform [Электронный ресурс] / Zurich Med Tech AG. – Режим доступа: <https://sim4life.swiss/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. – (Дата обращения: 01.03.2026).
3. Scheiner A., Mortimer J.T. Design and clinical application of a double helix electrode for functional electrical stimulation // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1994. – Vol. 41, № 5. – P. 425–432. – DOI: 10.1109/10.293217.

UDC 611.018.62

MUSCLE TISSUE MODEL UNDER ELECTROSTIMULATION

Gladkikh A.P., Sakovich M.S., Salaviev A.Ya.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kamlach P.V. - Cand. of Sci., Associate Professor

Churakov A.V. – Cand. of Sci., Associate Professor

Annotation. This article examines the computer modeling of human muscle tissue. The study is dedicated to analyzing the process of muscle electrical stimulation. The model includes muscle fibers, fascia, and electrodes. The development was carried out in the Sim4Life software environment. Muscle tissue is represented as a mesh structure of fibers. The fascia is modeled as a layer with reduced electrical conductivity. The electrodes are made of medical-grade stainless steel. The simulation was performed using alternating current exposure. The results demonstrated a non-uniform distribution of the electric field. It was revealed that the depth of effective exposure is limited to the surface layers.

Keywords: muscles, fascia, electrical stimulation, computer model.