

Реабилитация кисти и предплечья при помощи электроимпульсов

Е. Е. Ковалева, З. А. Аكوпова, Б. В. Шатов, А. С. Желдак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

lizatyt2@gmail.com, zlata.akopova@yandex.ru, b_shatov@inbox.ru, zheldaknastya@gmail.com

Аннотация. В работе представлена разработка модели перчатки для реабилитации после травм предплечья и кисти. Метод основан на воздействии током низкой частоты, который вызывает ритмичное сокращение мышечных волокон, улучшая микроциркуляцию и уменьшая атрофию тканей. Процедуры способствуют восстановлению двигательной активности, снижению болевого синдрома и отечности после травм.

Ключевые слова: стимуляция мышц, реабилитация кисти и предплечья

I. ВВЕДЕНИЕ

В мире часто встречаются переломы кистей и предплечий, различные травмы и растяжения. После травм всегда есть осложнения в виде слабого кровотока, атрофии мышц, хронических болей, артроза, а также повреждение нервов и сосудов, все это существенно ограничивают бытовую и профессиональную деятельность. Кисть человека является уникальным и сложнейшим инструментом, обеспечивающим выполнение как высокоточных манипуляций, так и силовых захватов. Травмы и заболевания предплечья и кисти занимают одно из ведущих мест в структуре патологий опорно-двигательного аппарата, приводя к длительной утрате трудоспособности. [1]

Современная реабилитация верхней конечности представляет собой комплексный процесс, сочетающий хирургические этапы восстановления анатомических структур с последующими длительными курсами физиотерапии и лечебной физкультуры. Несмотря на достижения в области реконструктивной хирургии, традиционные методы восстановления функций не всегда позволяют достичь желаемого результата в полном объеме и в приемлемые сроки. Ключевыми проблемами остаются борьба с отеком мягких тканей, замедленное восстановление нервной проводимости и мышечной силы, а также высокий риск развития тугоподвижности суставов. Реабилитация кисти и предплечья с использованием методов электростимуляции является активно развивающимся направлением современной медицины. Эффективностью этого подхода подтверждается многочисленными клиническими исследованиями, которые опираются на фундаментальные знания о физиологии нервно-мышечной проводимости. Использование электрических импульсов позволяет воздействовать на нервные окончания и мышечные волокна, способствуя восстановлению их функции после различных травм и заболеваний.

II. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Электроимпульсы направляют на поврежденные ткани для того, чтобы клетки двигательных нервов и мышечные волокна возбуждались, тем самым имитируют естественный сигнал из центральной нервной системы. Это приводит к пассивному сокращению мышцы, а в период паузы между импульсами она расслабляется. Такая работа позволяет эффективно тренировать мышцы и не раздражает кожу.

Основные параметры импульсов:

- Длительность импульса: обычно варьируется от 0,5 до 300 миллисекунд (мс).
- Частота импульса: чаще всего используется диапазон от 10 до 150 Герц (Гц). [2]
- Сила тока: зависит от области воздействия, для тела (в том числе для рук) — до 50 мА. [4]

При использовании перчатки для реабилитации наносится гель для улучшения электропроводности и стимулируется каждая зона под электродом в течении определенного времени. Током стимулируются только те мышцы, которые наименее всего задействованы или атрофированы. [1]

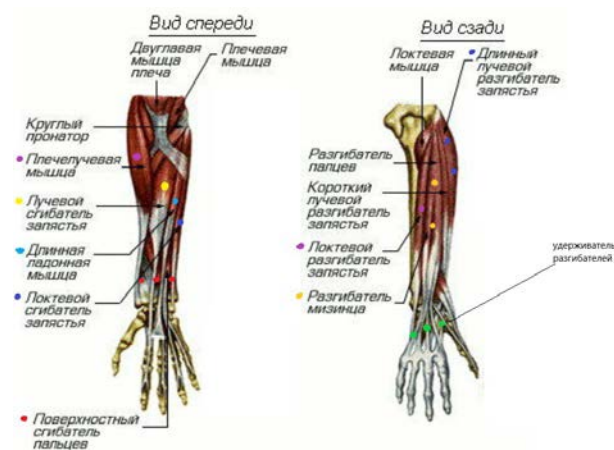


Рис. 1. Расположение электродов

Выделено определенное количество точек, которые нужно стимулировать, так как при переломе лучевой кости (рассматриваем один из худших вариантов для оценки эффективности) фиксируют локтевую для того, чтобы разгибание локтя не привело к смещению костей. Все мышцы кисти и предплечья начинают ослабевать и их нужно стимулировать для поддержания тонуса и быстрого восстановления.

Эффективность электростимуляции напрямую зависит от правильного выбора точек наложения электродов. Для этого необходимо учитывать функции поверхностных мышц предплечья и кисти, участвующих в сгибании, разгибании и хватательных движениях. В разработанной перчатке электроды располагаются в проекциях двигательных точек основных мышц, что позволяет достичь максимального мышечного ответа при минимальной силе тока.

Мышцы предплечья (передняя группа — сгибатели):

- *Плечелучевая мышца* — сгибает предплечье в локтевом суставе, стабилизирует кисть.
- *Круглый пронатор* — пронатор предплечья, участвует в сгибании локтя.
- *Лучевой сгибатель запястья* — сгибает и отводит кисть в лучевую сторону.
- *Длинная ладонная мышца* — натягивает ладонный апоневроз, участвует в сгибании кисти.
- *Локтевой сгибатель запястья* — сгибает и приводит кисть в локтевую сторону.
- *Поверхностный сгибатель пальцев* — сгибает средние фаланги II–V пальцев.

Мышцы предплечья (задняя группа — разгибатели):

- *Длинный и короткий лучевые разгибатели запястья* — разгибают и отводят кисть.
- *Разгибатель пальцев* — разгибает II–V пальцы и кисть.
- *Разгибатель мизинца* — разгибает V палец.
- *Локтевой разгибатель запястья* — разгибает и приводит кисть.
- *Супинатор* — супинирует предплечье.

III. ПРОЦЕСС РЕАБИЛИТАЦИИ

Реабилитация после перелома/травмы руки — это длительный и многоэтапный процесс, от качества которого зависит, насколько полно восстановится функция кисти и предплечья. Данный процесс делится на несколько этапов:

1. Имобилизационный. Длится примерно 3–5 недель. В это время рука должна находиться в состоянии покоя и не подвергаться никаким воздействиям. [4]

2. Постимобилизационный. Длится 4–6 недель. Можно вводить постепенную гимнастику и электростимуляцию при отсутствии боли. В этот период пациент может снимать гипс и надевать перчатку для реабилитации несколько раз в день.

3. Восстановительный. Длится 1.5–2.5 месяца после травмы. В этот период идет закрепление и улучшение результата, которого достигли в постимобилизационный период. [5]

Основным промежутком времени использования перчатки для реабилитации является постимобилизационный.

IV. РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ И УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Классический подход к электростимуляции для восстановления хватательной функции предполагает

наложение электродов не непосредственно на кисть, а на мышцы предплечья, которые управляют пальцами и сгибательной функцией кисти. На рис. 1 представлены точки для стимуляции мышц и нервной ткани лежащих на поверхности руки. Выбранные мышцы задействованы в основном функционале кисти и пальцев. Электроды располагаются на безопасном удалении от проекции локтевого, срединного и лучевого нервов, а также от пульсирующих сосудов, что минимизирует риск нецелевой стимуляции. Для усиления эффективности данной реабилитации, используется расположение электродов, соответствующее двигательным точкам мышц, это обеспечивает максимальный мышечный ответ при минимальной силе тока.

Перчатка для реабилитации включает в себя набор электродов со сменными пластинами электродов, каркас, напечатанный на 3d-принтере, основу в виде перчатки без пальцев, электрические компоненты (микросхема, аккумулятор, порт подзарядки).

На основе анатомических особенностей предплечья и кисти была разработана основа, состоящая из компрессионной ткани, которая плотно сидит на руке и предплечье. Для комфортного использования представлены три размера, которые можно регулировать благодаря бегункам, полностью состоящим из компрессорных отрезков на липучке. Такое регулирование позволяет следить за натяжением перчатки и притоком крови, не позволяя пережать вены. В отличие от стационарных аппаратов, предлагаемая конструкция обеспечивает плотное прилегание электродов к коже в области проекции мышц-сгибателей и разгибателей, что гарантирует стабильность импульса и безопасность процедуры.

Управление устройством происходит через контроллер Arduino, который способен выдавать токи до 40мА, что удобно для реабилитации. Ключевой особенностью схемы является генерация биполярных асимметричных импульсов, что реализуется через программу путем переключения полярности на электродах через Н-мост. Это исключает явление электролиза (накопления постоянного заряда в тканях) и делает воздействие безопасным для кожи пациента.

Для реабилитации созданы несколько программ:

- Стандартная гимнастика. Для поддержания тонуса и разработки основных мышц.
- Контроллер генерирует импульсы с частотой 30–50 Гц, с чередованием фаз сокращений 5 секунд воздействия и 10 секунд расслабления. [2]
- Лимфодренажный и противоотечный режим. Восстановление кровотока и снятие отека мягких тканей.
- Контроллер генерирует импульсы с частотой 20–30 Гц, что позволяет не сильно сокращать мышцы и просто создавать вибрацию мягких тканей.

V. ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ.

Показания к применению:

1. Восстановление после переломов кисти и предплечья.
2. Посттравматические отёки.
3. Восстановление атрофированных мышц.

Противопоказания:

1. Наличие не сращенных переломов
2. Индивидуальная непереносимость тока
3. Наличие кардиостимулятора
4. Гнойные воспаления в зоне применения.

Результаты, которые можно достичь благодаря использованию перчатки для реабилитации после травм:

1. Сократить сроки реабилитации на 20–30% относительно традиционных методов.
2. Увеличить амплитуду движений в суставах кисти.
3. Восстановить мелкую моторику, необходимую для бытовой и профессиональной деятельности.
4. Снизить болевой синдром.

Все параметры режимов (частота, длительность импульса, пауза) задаются в коде Arduino и изменяются под конкретные клинические задачи без перепайки схемы. Плавная регулировка силы тока осуществляется поворотом потенциометра, сигнал с которого считывается аналоговым входом контроллера.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая работа демонстрирует, что комплексный подход к проблеме, включающий в себя создание перчатки для реабилитации после травм предплечья и кисти, способствует быстрому восстановлению травмированной области. Разработка позволяет существенно повысить скорость восстановления предплечья и кисти после травмы, а также восстановить двигательную активность, снизить болевой синдром и отечность после травм.

Конструкция перчатки обеспечивает доступность и гибкость настройки параметров воздействия. Генерация биполярных асимметричных импульсов с переключением полярности через Н-мост исключает риск электролиза и делает процедуру безопасной для пациента.

Разработанные режимы работы — стандартная гимнастика (30–50 Гц) для поддержания тонуса мышц и лимфодренажный режим (20–30 Гц) для снятия отека — соответствуют клиническим рекомендациям и могут быть адаптированы под конкретные задачи реабилитации на разных ее этапах. Основным периодом применения устройства определен постиммобилизационный этап, когда уже возможно дозированное

воздействие при отсутствии болевого синдрома. Таким образом, предложенная перчатка для электростимуляции представляет собой перспективное средство реабилитации, способное сократить сроки восстановления и улучшить функциональные исходы у пациентов с травмами кисти и предплечья.

Разработанная модель перчатки для электростимуляции является эффективным и перспективным средством реабилитации пациентов с травмами предплечья и кисти. Компактность конструкции позволяет проводить процедуры не только в условиях стационара, но и амбулаторно, что повышает мобильность пациентов.

В дальнейшем исследования будут направлены на подбор индивидуальных параметров стимуляции в зависимости от тяжести травмы. А также будет происходить реабилитация кисти по средствам натяжения тросов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность Кузьминой Наталии Николаевне за возможность поучаствовать в конференции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Улащик В.С. Физиотерапия. Универсальная медицинская энциклопедия. Книжный дом, 2012.
- [2] Александров Н.М., Яковлев Н.М., Рукина Н.Н. Адаптивная тренировка с электромиографической обратной связью после устранения травматических дефектов пальцев и кисти // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. N 3. С. 18-21.
- [3] Витензон А.С., Петрушанская К.А., Скворцов Д.В. Руководство по применению метода искусственной коррекции ходьбы и ритмических движений посредством программируемой электростимуляции мышц. М.: Научно-медицинская фирма МБН, 2005. 300 с.
- [4] Мещерягина И.А., Скрипников А.А. Применение комбинированной электростимуляции при изолированных и сочетанных повреждениях периферических нервов верхних и нижних конечностей // Российский медицинский журнал. 2015.
- [5] Герасимов А.А., и др. Восстановление функции периферических нервов методом внутритканевой электростимуляции // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. №3. С. 16–21. URL: <https://lib.rucont.ru/efd/389750> (дата обращения: 23.03.2026)