

УДК 612.424.4/615.82(476)

М. Г. Киселев,  
 Е. И. Лабунь,  
 А. Н. Осипов,  
 М. В. Давыдов,  
 В. В. Киянко,  
 В. В. Киянко

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЛОПАСТИ-ЭЛЕКТРОДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ИМИТАТОРА КОЖНОГО ПОКРОВА

Разработана оригинальная конструкция имитатора кожного покрова человека, состоящая из медицинского стоматологического силикона, моделирующая его упругие свойства, и закрепленных в нем стальных булавок с расположением их сферических головок на рабочей поверхности силикона, моделирующих нервные окончания в кожном покрове. При помощи микроконтроллера Raspberry Pi исследуется модуляция электростимуляционного тока, возникающая в результате со- общения вынужденных вибраций активному электроду.

*Experimental complex for the investigation of the interaction process of rotating electrode blade and human skin imitator makes it possible to carry out experiments of EMS and mechanical massage combined influence without the use of humans. That allows to investigate such interactions on wider range of electrical and mechanical influences.*

### Введение

Современная физиотерапия обладает обширным набором инструментов, среди которых электроле- чение занимает особое место, т.к. с его помощью можно добиться разнонаправленных результатов воздействия: стимулирования мышц и нервов либо анальгезии. Область применения и параметры воз- действия электрического тока изучены достаточно хорошо, имеется богатая практика его применения, однако существует и ряд ограничений. Так, при использовании некоторых форм сигналов электрости- муляционного тока достигается весьма заметная ре- зультативность, однако такие процедуры не в такой степени легко переносятся пациентами, как менее эффективные формы импульсов.

При этом в современной физиотерапии суще- ствует тенденция на сочетание разнородных фак- торов для увеличения общей эффективности либо нивелирования отрицательных свойств отдельных из них. В этом ключе применение вынужденной вибрации активного электрода при осуществле- нии процедуры электростимуляции представляет особый интерес. В таком случае появляется воз- можность сочетать режимы электростимуляции и вибротерапии, достигая, например, электроаналь- гезирующего воздействия при вибростимуляции и в любых других вариациях, что было показано в предыдущих исследованиях [1,2]. Кроме того, в ходе их проведения был выявлен оптимальный ди- апазон частоты вращения насадки, при котором достигается наименьшая чувствительность в от- ношении проходящего через тело тока электрости- муляции у волонтеров.

Вместе с тем для раскрытия механизма аналь- гезирующего воздействия при вибрационном режиме выполнения процедуры по отношению к электростимуляционному току и обоснованию оптимального диапазона вибрационного воздей- ствия на электрод необходимо располагать легко воспроизводимыми и сформированными в удоб- ном для анализа виде данными механо-электриче- ского моделирования процесса периодического ударно-фрикционного взаимодействия электрода с поверхностью имитатора-модели, воспроизво- дящей механические свойства кожного покрова человека, разработанного авторами ранее [3]. И, в частности, оценить влияние этого взаимодей- ствия на условия протекания электрического сиг- нала через поверхность имитатора.

В этой связи цель данной работы заключалась в создании экспериментального комплекса, позво- ляющего моделировать процесс взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с поверхностью имитатора кожного покрова человека, позволяю- щего оценить изменения уровня напряжения на поверхности имитатора.

### Устройство экспериментального комплекса

Для проведения указанных экспериментов был разработан специальный комплекс, включающий в себя устройство контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека и измерительного блока. На рисунке 1а показана схема устройства контактного взаимодействия вращающейся ло- пасти-электрода с имитатором кожного покрова человека.

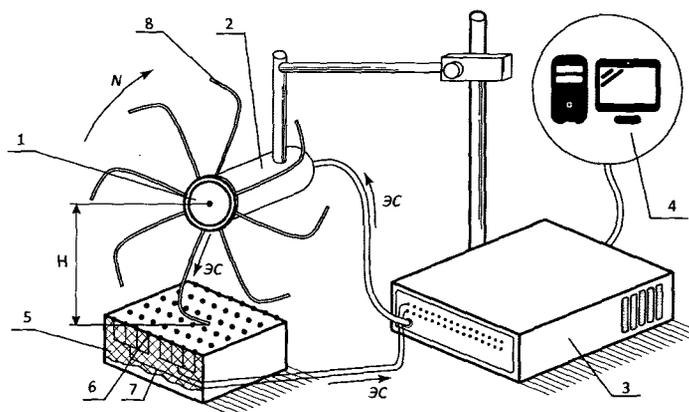


Рис. 1. Схема устройства контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека

Насадка 1 оснащена восемью консольно закрепленными лопастями 8, изготовленными из двух слоев ткани, пропитанной силиконом, между которыми располагается токопроводящая медная проволока, четыре из которых (последовательно для создания фазы релаксации мышцы) выполнены токопроводящими. Насадка закреплена на валу электродвигателя 2 и получает вращательное движение с регулируемой частотой  $N$ . В процессе этого движения лопасти периодически контактируют с поверхностью неподвижно закрепленного имитатора 5 кожного покрова человека. Он выполнен из медицинского стоматологического силикона, модуль упругости которого соответствует кожному покрову человека ( $(1-5) \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> [4]). В силиконе залиты 48 токопроводящих булавок-электродов 6, которые гальванически объединены на 16 равных по числу электродов выделенных групп, имитирующих нервные окончания. Расстояние между ними составляет  $2 \pm 1$  мм при размере контактной площадки имитатора 40x50 мм (рис. 16). Группы электродов подключены к выводам 7 микроконтроллера 3, который генерирует и регистрирует сигнал электростимуляции ЭС. Микроконтроллер управляется посредством компьютера 4.

Электрическая часть экспериментального комплекса выполнена следующим образом. Плата с микроконтроллером подключается двумя кабелями: первый кабель (mini-USB) используется для прошивки микроконтроллера, питания платы и передачи стимулирующего напряжения +5В, а второй кабель (micro-USB) передает данные по com-порту. Напряжение питания для контроллера +3,3В подается из микросхемы-стабилизатора. Аналого-цифровой преобразователь встроен в микроконтроллер. Измеряемое напряжение варьируется от 0 до 3,3 В. Так как у портов ввода/вывода нет программной настройки аналоговых входов на подтяжку к земле, то эта проблема была решена аппаратно, то есть каждый канал АЦП через резистор в 1 кОм был подключен на

землю. Необходимость наличия подтяжки обусловлена тем, что во время отсутствия контакта лопасти с имитатором кожного покрова АЦП регистрировал разного рода окружающие шумовые сигналы. Подтяжка килоомными резисторами создала делитель напряжения, поэтому максимальное регистрируемое напряжение составляло менее 3,3В, что позволяет оценить форму сигнала и изменение амплитуды на том или ином канале.

Данный блок с помощью аналого-цифрового преобразователя производит измерения аналогового сигнала по шестнадцати каналам частотой 250 Гц. Данные о напряжении на шестнадцати каналах находятся в оперативной памяти микроконтроллера. Аналого-цифровой преобразователь настроен на разрешающую способность величиной в восемь бит. При нажатии в приложении компьютера кнопки «Start» происходит отправка определенной команды микроконтроллеру, и он, помимо измерения с помощью аналого-цифрового преобразователя, также отправляет данные через интерфейс USB. Отправка данных производится после каждого измерения шестнадцати каналов. Выглядит это следующим образом: на один канал приходится восемь бит данных, а далее через USB-интерфейс отправляется шестнадцать байт подряд, начиная с первого канала. Отправка данных производится ровно до того момента, когда поступит команда для остановки. Структуру хранения данных в буфере компьютера можно увидеть на рисунке 2.

На компьютере используется программа, которая принимает массив данных, и, после завершения процедуры приема, она приступает к обработке полученной информации. Интерфейс программы показан на рисунке 3.

В программе предусмотрена кнопка «Connect/ Disconnect» и окошко выбора com-порта, позволяющая подключиться и отключиться к соответствующему com-порту. Справа от них располагается окошко, куда можно ввести значение, которое будет являться количеством секунд проводимого эксперимента, а за ним – кнопка «Start/ Stop», которая отвечает за запуск/остановку эксперимента. Рядом с кнопкой «Start/ Stop» имеется окошко, где отображается количество принятых байт. Затем можем увидеть горизонтальную полосу, которая заполняется в процессе течения времени эксперимента, что служит для визуализации. Последний элемент верхней части окна программы отображает количество прошедших секунд. Большую часть пространства окна программы, в середине, занимает виджет, на который выводится график (сигнал). В самом низу располагается горизонтальная полоса с шестнадцатью делениями и ползунком. Если ползунок находится на первом делении, то выводится график сигнала первого канала АЦП. Передвинув ползунок с первого деления на второе, мы отобразим график второго канала.

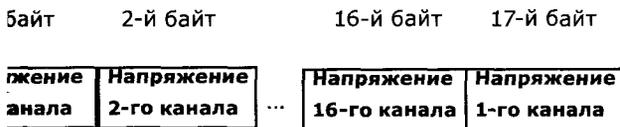


Рис. 2. Структура данных передаваемой информации

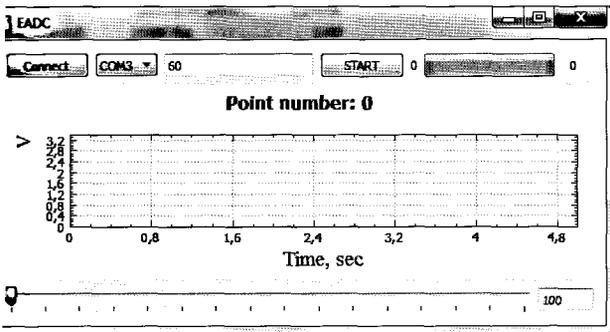


Рис. 3. Интерфейс ПО, примененного в исследованиях

имитатора [3]. Частота вращения насадки  $N$  составляла последовательно 90, 150, 250 мин<sup>-1</sup>. Затем процедура повторялась при увеличении величины натяга лопасти. Во всех случаях общая длительность взаимодействия составляла 30 секунд.

Микроконтроллер регистрирует наличие и величину напряжения на выделенной группе булавок-электродов один раз в четыре миллисекунды. Пример данных, полученных от одной из групп булавок, показан на рисунке 4.

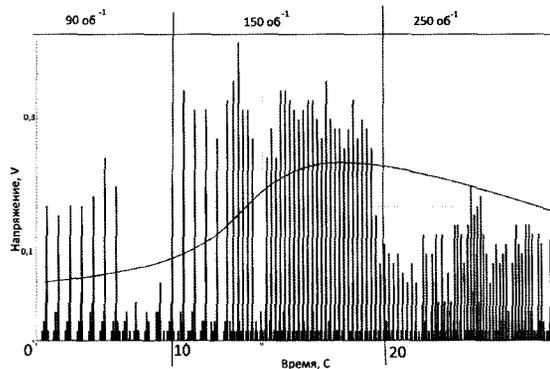


Рис. 4. Пример данных, полученных экспериментально

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о работоспособности созданного экспериментального комплекса, который позволяет количественно оценивать влияние условий контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека на интенсивность протекания процесса электростимуляции с использованием постоянного тока. В частности, из анализа приведенных данных следует, что как с повышением частоты вращения, так и величины ее натяга частота электростимуляционного воздействия на электроды имитатора кожного покрова возрастает. При этом на выявленном ранее диапазоне вращения насадки в 120–150 мин<sup>-1</sup> интенсивность воздействия в среднем значительно выше (вплоть до 60%), что можно связать с механическими явлениями упругого соударения гибких лопастей и поверхности силиконового имитатора, при которых лопасть во время фрикционной фазы взаимодействия совершает колебания и электроконтакт периодически отсутствует.

### Выводы

1. Разработана оригинальная конструкция имитатора кожного покрова человека, состоящая из медицинского стоматологического силикона, моделирующая его упругие свойства, и закрепленных в нем стальных булавок с расположением их сферических головок на рабочей поверхности силикона, моделирующих нервные окончания в кожном покрове.
2. Создан экспериментальный комплекс, включающий в себя устройство контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с поверхностью имитатора кожного покрова человека и измери-

Таким образом, при нажатии «Start» запускается эксперимент длительностью  $T$  секунд, в течение которого принимаются данные с микроконтроллера, по завершении эксперимента (по прошествии времени  $T$ ) кнопка «Stop» срабатывает автоматически и происходит вывод данных на график, то есть сигнал, проходящий через имитатор кожного покрова. Двигая ползунок, мы можем посмотреть сигнал на любом канале из шестнадцати. Программа автоматически экспортирует массив данных в таблицы формата MS Excel.

### Методика проведения экспериментов

С целью оценки работоспособности созданного экспериментального комплекса были проведены предварительные эксперименты по исследованию особенностей взаимодействия вращающейся лопасти-электрода и имитатора кожного покрова человека в процессе электростимуляции. Методика проведения эксперимента заключается в следующем.

Предварительно насадка с лопастями плавно подводится к поверхности имитатора кожного покрова на расстояние, при котором между ними возникает электрический контакт. Это положение насадки соответствует нулевому натягу лопасти ( $H=0$ ). За счет уменьшения от этого положения расстояния между осью вращения насадки и поверхности имитатора устанавливается требуемая величина натяга лопастей. На лопасти при помощи встроенного токосъемного устройства подается постоянный ток напряжением +5В, который затем поступает на выводы микросхемы, подключенной к ПК, где и регистрируется на каждом отдельном электроде имитатора с частотой 250Гц при помощи ПО собственной разработки. После этого включается электродвигатель для обеспечения вращения насадки, лопасти, которые оказывают ударно-фрикционное воздействие на поверхность

тельный блок, позволяющий количественно оценить влияние указанного взаимодействия на интенсивность протекания процесса электростимуляции с использованием постоянного тока, т.е. измерять уровень напряжения на 16 независимых группах электродов имитатора с частотой вплоть до 250 Гц. 3. Результатами проведенных предварительных экспериментов подтверждена работоспособность созданного экспериментального комплекса. В частности, получены данные, отражающие влияние частоты вращения лопасти-электрода и величины ее натяга на процесс электростимуляции постоянным током имитатора кожного покрова человека. На основании их анализа установлено, что на ранее выявленном диапазоне вращения насадки в 120-150 мин<sup>-1</sup> интенсивность воздействия в среднем значительно выше (вплоть до 60%), чем при больших или меньших частотах.

*Список использованной литературы*

1. Киселев М.Г., Осипов А.Н., Лабунь Е. И. и др. // Докл. БГУИР.– 2014. – №1. – С. 53–58.
2. Киселев М.Г. , Осипов А.Н., Волотовская А.В. и др. // Военная медицина. 2014.– №2 (31). – С. 71-77.
3. Киселев М.Г., Осипов А.Н., Лабунь Е. И. и др. // Докл. БГУИР. 2015.– №3. – С. 18–22.
4. Manschot-JF; Brakkee-AJ //J-Biomech. 1986; 19(7). P. 511-515.

**Михаил Григорьевич Киселев**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Конструирование и производство приборов" приборостроительного факультета БНТУ;

**Евгений Игоревич Лабунь**, аспирант кафедры "Конструирование и производство приборов" приборостроительного факультета БНТУ;

**Анатолий Николаевич Осипов**, кандидат технических наук, доцент, первый проректор БГУИР;

**Максим Викторович Давыдов**, кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии БГУИР;

**Вадим Валерьевич Киянко**, студент кафедры электронной техники и технологии факультета компьютерного проектирования БГУИР;

**Виктория Викторовна Киянко**, студентка кафедры электронной техники и технологии факультета компьютерного проектирования БГУИР

*Дата поступления 25.06.2015 г.*