

УДК 612.424.4/615.82

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЛОПАСТИ-ЭЛЕКТРОДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ИМИТАТОРА КОЖНОГО ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА

М.Г. КИСЕЛЕВ\*, Е.И. ЛАБУНЬ\*, А.Н. ОСИПОВ,  
М.В. ДАВЫДОВ, В.В. КИЯНКО, В.В. КИЯНКО

*\*Белорусский национальный технический университет  
Независимости 65, Минск, 220013, Беларусь*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 14 ноября 2014*

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.

*Ключевые слова:* электростимуляция, физиотерапия, аппаратный массаж.

### Введение

Электростимуляция является важным инструментом физиотерапии и медицинской реабилитации. Особый интерес представляет собой сочетание электростимуляции и вибротерапии, при котором вибрационные колебания подаются на электрод. В таком случае появляется возможность сочетать режимы электростимуляции и вибротерапии, достигая, например, электроанальгезирующего воздействия при вибростимуляции и в любых других вариациях. В работах [1, 2] был выявлен оптимальный диапазон частоты вращения насадки, при котором достигается наибольший прирост динамометрических показателей мышечного сокращения у волонтеров после курса процедуры электростимуляции в сочетании с механическим воздействием.

Вместе с тем, для раскрытия механизма анальгезирующего воздействия вибрационного воздействия по отношению к электростимуляционному току и обоснованию оптимального диапазона вибрационного воздействия на электрод, необходимо располагать легко воспроизводимыми данными механо-электрического моделирования процесса периодического ударно-фрикционного взаимодействия электрода с поверхностью имитатора-модели кожного покрова человека. В частности, оценить влияние этого взаимодействия на условия протекания электрического сигнала через поверхность имитатора.

В связи с этим, цель данной работы заключалась в создании экспериментального комплекса, позволяющего моделировать процесс взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с поверхностью имитатора кожного покрова человека.

### Устройство экспериментального комплекса

Для проведения указанных экспериментов был изготовлен специальный комплекс, включающий в себя устройство контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека и измерительного блока. На рис. 1 показана 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  $((1-5) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 [3])$ . В силиконе залиты 49 токопроводящих булавок-электродов 6, имитирующих нервные окончания. Расстояние между ними составляет  $2 \pm 1 \text{ мм}$ , при размере контактной площадки имитатора  $40 \times 50 \text{ мм}$  (см. рис. 2). Электроды подключены параллельно к общей шине 7. Сигнал электростимуляции ЭС генерируется и регистрируется при помощи микроконтроллера 3, управляемого компьютером 4.

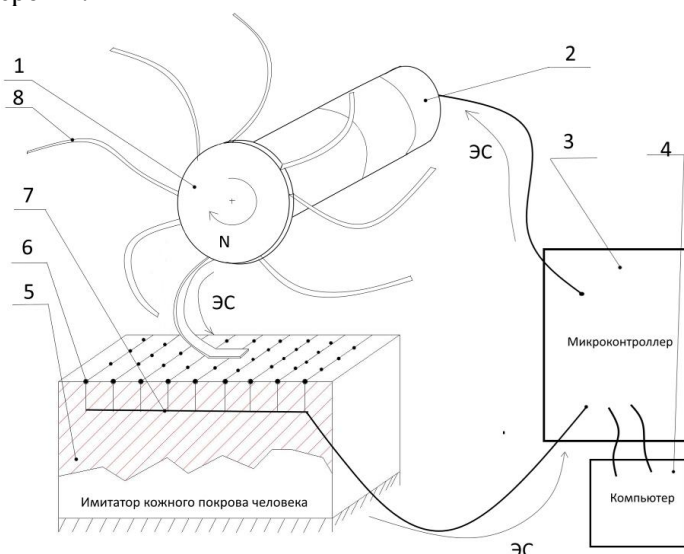
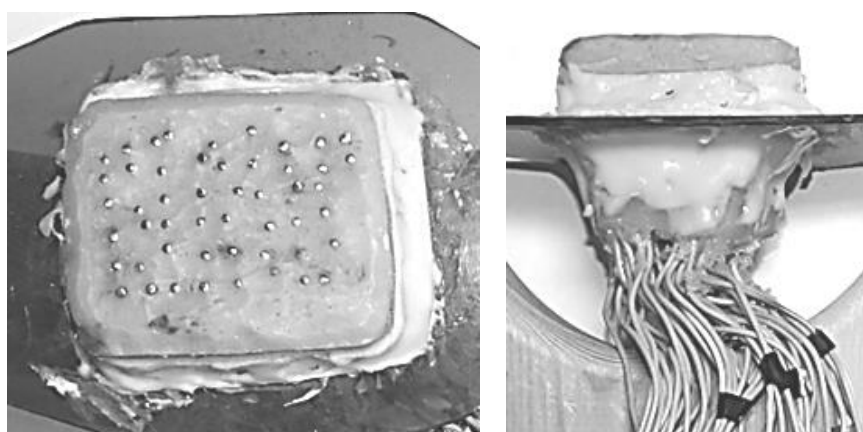


Рис. 1. Схема устройства контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека



вид сверху

вид сбоку

Рис. 2. Фотография имитатора кожного покрова человека

Для регистрации и анализа электрических параметров взаимодействия используется плата с микроконтроллером, подключаемая к ПК двумя кабелями. Первый mini-USB кабель необходим для прошивки микроконтроллера, питания платы и использования в качестве стимулирующего напряжения  $+5 \text{ В}$ . Второй micro-USB кабель используется для передачи данных по com-порту. Напряжение питания для контроллера  $+3,3 \text{ В}$  доступно из микросхемы-стабилизатора.

При нажатии на кнопку «ON/OFF» в приложении компьютера, запускается цикл чтения состояния портов с частотой 85 Гц, а при повторном нажатии считывание прекращается. Передача по com-порту осуществляется по 8 бит данных. Каждый байт передает состояние  $i$ -й ножки контроллера. Таким образом, 49 ножек составляют 49 байт данных, которые передаются при единичном считывании состояния ножек контроллера. В дальнейшем эти 49 байт будем именовать пакетом данных. При этом, 8 бит (1 байт) данных содержат: 0-й бит – состояние ножки (0 либо 1); 1–6-й биты – номер считываемой ножки (от 0 до 48), и 7-й бит всегда равен нулю, он – резервный. Схематичное изображение байта передаваемой информации показано на рис. 3.

7 бит	6 бит	5 бит	4 бит	3 бит	2 бит	1 бит	0 бит
Равен 0	Номер считываемой ножки, т.е. = $i$						Состояние $i$ -й ножки

Рис. 3. Схематичное изображение байта передаваемой информации

На рис. 4 показан интерфейс программного обеспечения собственной разработки используемого на ПК при проведении эксперимента. Программа на ПК принимает пакет данных, после завершения процедуры приема происходит его обработка. Для этого берется состояние ножки (0 бит) и ее номер (1–6 биты), которые затем записываются в ячейку массива-таблицы, при этом в нем имеется 49 ячеек. После завершения записи они выводятся на форму, после этого снова совершается прием данных, и далее состояние ножек суммируется с прошлым состоянием и выводится на форму в соответствующие окошки, и так до тех пор пока нажата кнопка «ON». Таким образом, массив накапливает состояния каждой ножки.

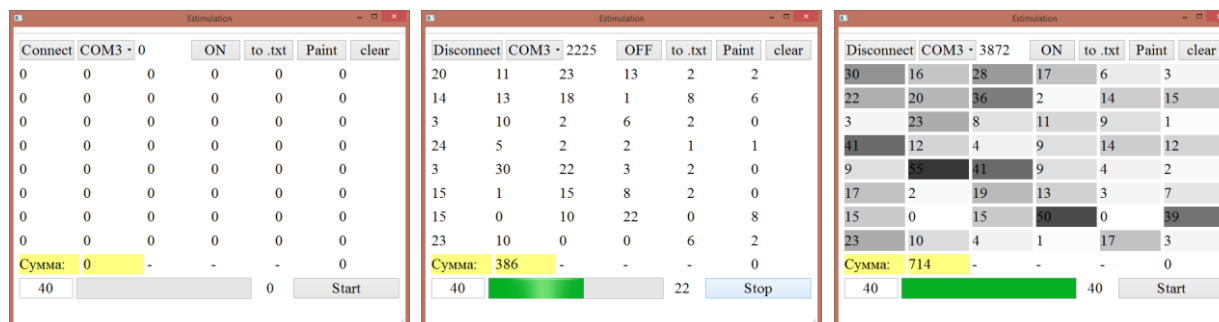


Рис. 4. Интерфейс программного обеспечения

Кроме кнопки «ON/OFF», в интерфейсе имеется кнопка «Connect/Disconnect» и окно выбора com-порта. Они позволяют подключиться к соответствующему com-порту и отключиться от него. Справа от них располагается окошко, где отображается количество принятых пакетов. Кнопка «to.txt» выводит данные о накопленных состояниях ножек в файл с расширением «txt», который впоследствии возможно просмотреть/редактировать в любом текстовом редакторе. «Paint» также является кнопкой, при нажатии на которую задний фон окошек с данными о накопленных состояниях ножек приобретает серый цвет. Окошки с большим числом окрашиваются в более темный оттенок серого, с меньшим – в более светлый. Кнопка «clear» предназначена для очистки данных и фона окошек. Существует отдельное окошко, окрашенное в желтый цвет, в котором находится сумма данных из всех окошек. В нижней части программы располагаются элементы для частичной автоматизации экспериментов (будем описывать их слева-направо). Первый элемент – окошко, в которое можно ввести значение, которое будет являться числом целых секунд проводимого эксперимента. Второй – горизонтальная полоса, которая заполняется в процессе эксперимента и служит для визуализации. Третий – отображает количество прошедших секунд. Четвертый – кнопка «Start/Stop», которая начинает и, при необходимости, преждевременно завершает эксперимент.

При нажатии «Start» обнуляются значения во всех 50 окнах (49 окон данных и окно суммы), затем запускается эксперимент, в течение которого принимаются данные с микроконтроллера. Окна данных и суммы заполняются, по завершении эксперимента кнопка «Stop» срабатывает автоматически.

## 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 расстояния между осью вращения насадки и поверхностью имитатора устанавливается требуемая величина натяга лопастей ( $H$ ). 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 85 Гц при помощи ПО собственной разработки. После этого включается электродвигатель для обеспечения вращения насадки и лопасти, которые оказывают ударно-фрикционное воздействие на поверхность имитатора [4]. Частота вращения насадки  $N$  составляла последовательно 90, 150, 250 мин<sup>-1</sup>. Затем процедура повторялась при увеличении величины натяга лопасти. Во всех случаях длительность взаимодействия составляла 40 секунд.

При каждом такте регистрации, который происходит 1 раз в 12 мс, если микроконтроллер регистрирует наличие на булавке-электроде напряжения, в соответствующую  $i$ -ю ячейку таблицы заносится одна логическая единица. Значения последующих тактов суммируются с предыдущими.

Конечная сумма всех ячеек таблицы за прошедшее время эксперимента является комплексной характеристикой и отражает как площадь участка электроконтакта (дискретизируемая по 49 булавкам-электродам, расположенным на поверхности имитатора), так и общую длительность электрического взаимодействия. При этом имеется возможность и оперировать «картой» (т.е. таблицей) участков, подвергшихся электростимуляции булавок-электродов имитатора. При равной конечной сумме может возникнуть такая ситуация, при которой площадь воздействия при большей интенсивности в одном случае меньше, чем в другом. В таблице приведены усредненные значения конечных сумм ячеек таблицы  $\sum_k$ .

**Усредненные значения конечных значений сумм ячеек таблицы  $\sum_k$ , полученных при различной частоте вращения насадки и различной величине натяга лопастей**

$N, \text{ мин}^{-1}$	Усредненные значения конечных значений сумм ячеек таблицы, $\sum_k$ , ед.	
	Величина натяга $H$ , мм	
	5	20
90	2564	2604
150	2667	2707
250	2770	2965

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 натяга, так и величины ее натяга, интенсивность электростимуляционного воздействия на электроды имитатора кожного покрова возрастает. В дальнейшем планируется с использованием созданного экспериментального комплекса провести исследования, направленные на определение оптимальных условий контактного взаимодействия вращающейся лопасти-электрода с имитатором кожного покрова человека, обеспечивающие наибольший уровень электростимуляционного воздействия.

## 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 измерительный блок, позволяющий количественно оценивать влияние режимов указанного взаимодействия (частота вращения лопасти-электрода и величина ее натяга) на значение интенсивности суммарного электростимуляционного воздействия на отдельные электроды имитатора кожного покрова человека.

3. Результаты проведенных предварительных экспериментов подтверждают 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 как с повышением частоты вращения лопасти-электрода, так и величины ее натяга интенсивность электростимуляционного воздействия возрастает.

## EXPERIMENTAL COMPLEX FOR THE INVESTIGATION OF THE INTERACTION PROCESS OF ROTATING ELECTRODE BLADE AND HUMAN SKIN IMITATOR

M.G. KISELEV, E.I. LABUN, A.N. OSIPOV, M.V. DAVYDOV, V.V. KIYANKO, V.V. KIYANKO

### Abstract

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.

### Список литературы

1. Киселев М.Г., Осипов А.Н., Лабунь Е.И // 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. Manschot-JF; Brakkee-AJ // J-Biomech. 1986. № 19 (7). P. 511–515
4. Лабунь Е.И., Киселев М.Г., Дроздов А.В и др. // Метрология и приборостроение. 2013. №1 (6). С. 22–26.