

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИМЕРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В МАКЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Д. В. Толкович

Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия
pyby@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Токпроводящие материалы, изготовленные на основе двухкомпонентных полимеров, используются в различных отраслях промышленности уже достаточно долгое время. Однако публикации, связанные с моделированием структуры таких полимеров, не часто попадают на страницы печатных изданий. В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, используемого в качестве эквивалента кожи человека для моделирования и исследования биоэлектрических сигналов. *Материалы и методы.* Для достижения цели в работе использовались методы имитационного моделирования, а именно математическое и статистическое моделирование. *Результаты.* В процессе имитационного моделирования была разработана и графически реализована модель двухкомпонентного токопроводящего полимера. Компоненты полимера представлены в виде отдельных кубиков («зерен») одного размера. Зерна объединены между собой в кубические ячейки, состоящие из 27 зерен. Соотношение общего количества проводящих и изолирующих зерен в составе материала выведено на основе соотношения изначальных объемов компонентов, а также на допущении об испарении (в процессе полимеризации материала) жидкостной составляющей токоизолирующего компонента. *Выводы.* При задании электрических характеристик для материалов как в общем случае, так и для отдельных зерен предложенная модель позволяет оценить теоретическую проводимость материала в цепях постоянного тока. В перспективе представленную модель можно и нужно адаптировать как для определения проводимости разработанного материала в цепях переменного электрического тока, так и для определения электрической проводимости других двухкомпонентных токопроводящих полимеров в цепях постоянного и переменного тока. Предложенная модель позволит создавать двухкомпонентные полимеры с заданными электрическими характеристиками, в том числе для применения в области регистрации и обработки биоэлектрических сигналов.

Ключевые слова: модель, токопроводящий полимер, электрическая проводимость, электрическое сопротивление, графит, каучук

Для цитирования: Толкович Д. В. Имитационное моделирование структуры токопроводящего полимера, используемого в макетных исследованиях биоэлектрических сигналов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 2. С. 144–153. doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-9

SIMULATION MODELING OF THE STRUCTURE OF A CONDUCTIVE POLYMER USED IN PROTOTYPE STUDIES OF BIOELECTRIC SIGNALS

D.V. Tolkovich

Scientific and Production Enterprise "Radar mms", St. Petersburg, Russia
pyby@inbox.ru

Abstract. *Background.* Current materials based on two-component polymers have been used in various industries for quite a long time. However, publications related to modeling the structure of such polymers do not often make it to the pages of printed publications. In the present work an attempt is made to propose and substantiate an equivalent model of the internal structure of conductive material with given properties, used as an equivalent of human skin for modeling and research of bioelectric signals. *Materials and methods.* To achieve the goal, the work used simulation methods, namely, mathematical and statistical modeling. *Results.* A model of two-component current-conducting polymer was developed and graphically realized in the process of simulation modeling. Polymer components are represented as separate cubes ("grains") of the same size. The grains are combined with each other into cubic cells consisting of 27 grains. The correlation of total number of conducting and insulating grains in the material is based on the ratio of initial volumes of components, as well as on the assumption of evaporation (in the process of polymerization) of a liquid component of the current-insulating component. *Conclusions.* When specifying the electrical characteristics for materials, both in general case and for individual grains, the proposed model allows to estimate the theoretical conductivity of material in DC circuits. In the future, the presented model can and should be adapted both to determine the conductivity of the developed material in AC circuits, and to determine the electrical conductivity of other two-component current-conducting polymers in DC and AC circuits. Also, the proposed model will make it possible to create two-component polymers with specified electrical characteristics, including applications in the field of registration and processing of bioelectric signals.

Keywords: model, conductive polymer, electrical conductivity, electrical resistance, graphite, rubber

For citation: Tolkovich D.V. Simulation modeling of the structure of a conductive polymer used in prototype studies of bioelectric signals. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(2):144–153. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-2-9

Введение

Токопроводящие материалы, изготовленные на основе двухкомпонентных полимеров, используются в различных отраслях промышленности уже достаточно долгое время. Однако публикации, связанные с моделированием структуры таких полимеров, не часто попадают на страницы печатных изданий. В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, используемого в качестве эквивалента кожи человека для моделирования и исследования биоэлектрических сигналов.

В ходе информационного поиска были найдены несколько работ, имеющих некоторое не прямое отношение к технологиям разработки и производства токопроводящих материалов на базе графита и углеродосодержащих компонентов [1–4]. Однако все упомянутые работы не затрагивают область медицинской

техники, а относятся к другим областям: нефтепереработке (обогрев трубопроводов), строительству и т.д. Несмотря на то, что работа [4] была опубликована не так давно (2018), там в явном виде сказано, что «массовое производство электропроводящих композиционных материалов сдерживается отсутствием модели электропроводности токопроводящих композитов, позволяющей интерполировать электрическую проводимость в зависимости от концентрации и агрегации частиц токопроводящей фазы, необходимой для проектирования составов материалов с заданными стабильными токопроводящими характеристиками». Во всех рассмотренных выше работах изучались свойства конкретных материалов, но отсутствовали попытки построения математических моделей для структуры и свойств исследуемых материалов.

Постановка задачи

Электрофизиологические диагностические приборы предназначены для регистрации в режиме реального времени не воспроизводимых повторно сигналов, имеющих значительную произвольную компоненту, поэтому невозможно использовать сам биологический объект в качестве источника эталонных или тестовых сигналов. Отсюда для проверки качества работы электрофизиологических приборов требуется создание устройства, способного на воспроизведение сложных динамических сигналов, с заданной степенью достоверности эквивалентных сигналам биологического объекта. Существующие аппаратные решения с использованием современных генераторов, как правило, не способны адекватно воспроизвести вышеописанные сигналы. На рис. 1 графически показаны типовые интервалы изменения основных электрофизиологических сигналов. Все сигналы имеют малую амплитуду и лежат в диапазоне низких частот. На результаты измерения этих сигналов влияют и характеристики кожи человека, на которой фиксируются регистрирующие электроды, поэтому при изучении распространения электрофизиологических сигналов необходимо опираться на электрическую проводимость кожи человека.

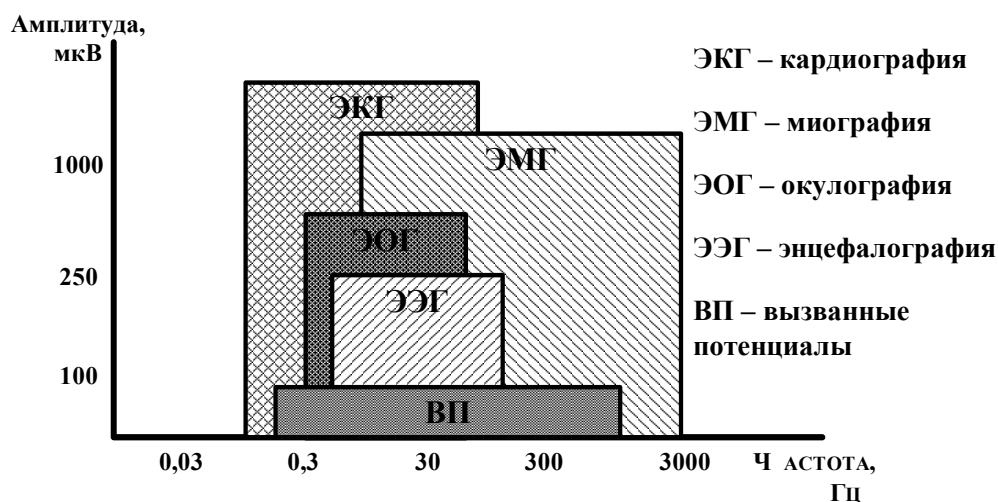


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики типовых электрофизиологических сигналов

В данной работе сделана попытка предложить и обосновать эквивалентную модель внутренней структуры токопроводящего материала с заданными свойствами, схожего по своим электрическим параметрам с кожей человека. Исследуемый токопроводящий материал предназначен для имитации кожи человека на поверхности специального манекена, выполненного в форме торса взрослого мужчины в масштабе 1 к 1. Под слоем токопроводящего материала согласно типовым схемам [5] размещены электроды для воспроизведения электрофизиологических сигналов (ЭКГ, ЭМГ, ЭЭГ и т.д., рис. 1). Манекен входит в состав комплекса для моделирования электрофизиологических исследований, куда также входят блок генерации электрофизиологических сигналов и блок управления на базе микрокомпьютера [6]. Манекен предназначен в качестве тест-объекта при проверке медицинских электрофизиологических диагностических регистрирующих приборов либо для обучения младшего медицинского персонала.

Основная часть

Электрическая проводимость живой ткани определяется не только физическими свойствами, но и сложнейшими биохимическими и биофизическими процессами [7]. В связи с этим сопротивление тела человека является переменной величиной, имеющей нелинейную зависимость от множества факторов, в том числе от параметров электрической цепи, состояния кожи, физиологических факторов и состояния окружающей среды [8]. Удельное объемное сопротивление кожи в сухом и незагрязненном состоянии составляет от $3 \cdot 10^3$ до 10^6 Ом · м при частоте тока 50 Гц [7, 8].

Активное сопротивление наружного слоя кожи R_n зависит от удельного объемного сопротивления наружного слоя кожи (эпидермиса) ρ_n значения которого находятся в пределах 10^4 – 10^5 Ом · м, от площади электрода S (м²), от толщины эпидермиса d (м) и определяется по формуле [9]

$$R_n = \rho_n \frac{d}{S}.$$

Емкостное сопротивление обусловлено тем, что в месте прикосновения электрода к телу человека образуется как бы конденсатор [7], обкладками которого являются электрод и хорошо проводящие электрический ток ткани тела человека, лежащие под наружным слоем кожи, а диэлектриком – эпидермис. Получается плоский конденсатор, емкость которого зависит от площади электрода S (м²), толщины эпидермиса d (м) и диэлектрической проницаемости эпидермиса ϵ , которая зависит от многих факторов: частоты приложенного напряжения, температуры кожи, наличия в коже влаги и др. При токе 50 Гц значения ϵ находятся в пределах от 100 до 200. Емкость конденсатора (Ф) определяется по формуле

$$C_n = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

В нормальных условиях C_n колеблется в пределах от нескольких сотен пикофард до нескольких микрофард [10].

Эквивалентную схему электрического сопротивления кожи человека можно представить как параллельное соединение сопротивления R_h и емкости C_h тела человека (рис. 2).

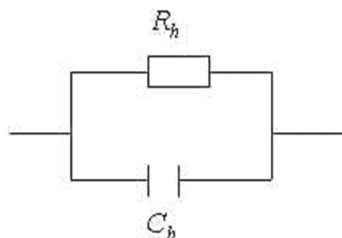


Рис. 2. Упрощенная схема замещения сопротивления кожи человека

Поскольку использовать живую ткань в качестве макета не представляется возможным, то приходится искать аналоги по набору характеристик. Кожа человека по характеристикам ближе к диэлектрикам, но все же имеет малую электрическую проводимость.

Имитирующий по электрическим параметрам кожу человека токопроводящий полимер должен соответствовать следующим требованиям:

- быть достаточно пластичным для нанесения на поверхность манекена и достаточно прочным для фиксации электродов внутри материала;
- иметь удельное электрическое сопротивление в интервале от 500 кОм до 1 МОм на см^2 (кожа человека допускает вариацию по электрическому сопротивлению, зависящую от влажности и солевого баланса);
- быть смачиваемым для обеспечения возможности использования медицинских электропроводящих гелей;
- быть устойчивым к воздействию медицинских дезинфицирующих и обеззараживающих средств;
- быть устойчивым к механическим воздействиям, способным возникнуть в процессе эксплуатации манекена;
- быть нетоксичным.

В результате анализа технологии производства токопроводящих изделий с высоким удельным сопротивлением было выяснено, что эти изделия состоят из взаимного объединения материала основы (обладающего высоким электрическим сопротивлением) и мелкодисперсного токопроводящего материала (обладающего низким электрическим сопротивлением). Обычно в качестве токопроводящего материала могут быть использованы порошковые металлы и графит. Однако в нашем случае порошковые металлы неприменимы [11], так как требуется материал с достаточно высоким удельным сопротивлением, а использование металлов не даст возможности повышать сопротивление, так как у металлов отсутствует какая-либо зависимость сопротивления, связанная с площадью соприкосновения токопроводящих частиц (при условии соприкосновения частиц). В то же время для графита такая зависимость явно выражена и описана в литературе [8].

Результаты

В результате ряда теоретических изысканий и практических экспериментов было принято решение в качестве материала основы использовать

хлоропеновый каучук 88-СА, удельное объемное электрическое сопротивление которого колеблется в пределах 10^{10} – 10^{14} Ом · м (10^{12} – 10^{16} Ом · см) [12]. В качестве токопроводящего материала было решено использовать графит марки С-1 [ТУ 113-08-48-63-90], удельное сопротивление которого составляет 0,0075 Ом [13].

Для упрощения процесса моделирования токопроводящего материала высказывается допущение, что разработанный токопроводящий материал представляет собой совокупность независимых элементов кубической формы, сопряженных между собой без каких-либо дополнительных соединительных элементов. При этом каждый из кубических элементов является единым и неделимым, однако в целях моделирования представлен как кубическая ячейка, сформированная из 27 одинаковых по форме элементов (фрагментов/зерен) с ребром, по длине равным трем диаметрам зерна графита при условии, что зерна графита рассматриваются как идеальные сферы равного размера. Тогда соотношение размеров одной ячейки и одиночного зерна (графита, вписанного в куб) можно считать равным 27:1. Сделаем допущение, что весь объем материала будет равномерно заполнен графитом и каучуком, при этом в той области пространства, где нет графита, будет каучук и наоборот; отсюда можно определить соотношение объемов для графита и каучука в одной ячейке.

Изначально создание материала определялось соотношением массовых долей графита и каучука в некотором объеме. В момент смешивания были заданы пропорции 15 массовых долей графита на 100 массовых долей каучука. Таким образом, в момент смешивания масса образца составляла 115 массовых долей. Поскольку при застывании испарялись и улетучивались только компоненты жидкого каучука, то массовая доля графита оставалась неизменной, а массовая доля каучука уменьшалась.

Если в качестве 100 массовых долей взять 1 кг каучука, то при плотности каучука равной $0,86 \text{ г/см}^3$ получаем, что объем 100 массовых долей (1 кг) клея составляет $1162,79 \text{ см}^3$. При плотности графита равной $2,23 \text{ г/см}^3$ получаем, что объем 15 массовых долей (0,15 кг) графита составляет $67,3 \text{ см}^3$.

Согласно документации [12], коэффициент высыхания состава равен 80–90 % (после высыхания останется 10–20 % твердой фракции каучука).

Для дальнейшего моделирования был выбран вариант с минимальным высыханием каучука (испарилось 80 % летучих фракций, 20 % осталось) как наименее электропроводный (имеющий наибольшее электрическое сопротивление). Варианты с большим высыханием каучука будут иметь меньшее электрическое сопротивление за счет большего количества графита на единицу объема.

Величина соотношения объема графита к общему объему, равная 0,224 (табл. 1), достаточно близка к соотношению 6 к 27 (0,222), где 6 – объемная доля графита, а 27 – общий объем материала в единице объема (кубической ячейке). Следовательно, соотношение 6 к 27 может представлять распределение графита в единичном объеме материала.

Таблица 1

Процент высыхания клея	Объем графита	Объем каучука после высыхания	Общий объем материала	Объем графита по отношению к общему объему
90 %	$67,3 \text{ см}^3$	$116,279 \text{ см}^3$	$183,579 \text{ см}^3$	0,3665
85 %	$67,3 \text{ см}^3$	$174,4185 \text{ см}^3$	$241,7185 \text{ см}^3$	0,2784
80 %	$67,3 \text{ см}^3$	$232,558 \text{ см}^3$	$299,858 \text{ см}^3$	0,2244

Согласно предлагаемой модели каждое зерно представляет собой кубический элемент, электрические характеристики которого неизменны и равнозначны в направлении между любыми двумя противоположными гранями, поэтому в качестве наиболее близкого эквивалента электрического сопротивления предлагается использовать схему, представленную на рис. 3,а. Данная схема представляет собой шесть резисторов одного номинала, соединенных в одной общей точке [14] и пространственно расположенных таким образом, что свободные контакты резисторов выходят на центры граней зерна (рис. 3,б). Такая модель позволяет считать, что в любом направлении между противоположными гранями сопротивление остается постоянным и неизменным. Эта реализация схемы позволяет воспроизводить как проводящие (графит), так и непроводящие (каучук) зерна, отличие между которыми заключается только в номинальных значениях сопротивлений. Соответственно, кубическая ячейка представлена в виде трех соединенных между собой слоев, каждый из которых состоит из девяти элементов, также соединенных между собой (рис. 3,в).

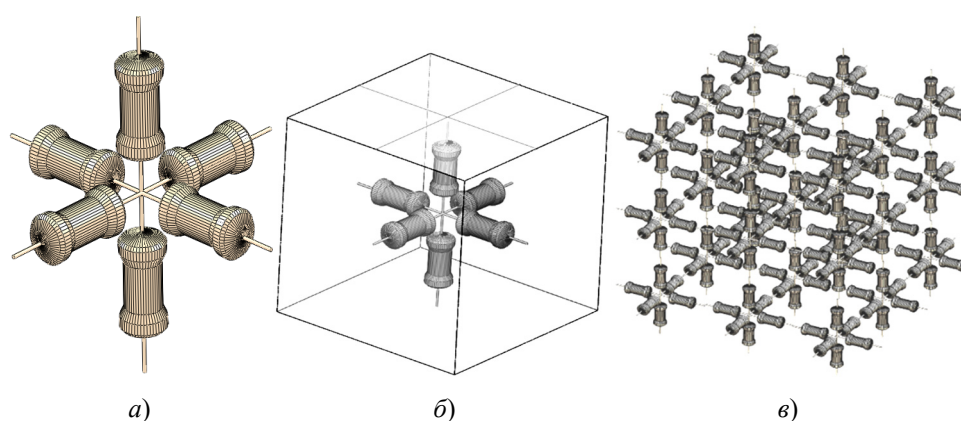


Рис. 3. Модель электрического сопротивления отдельного зерна и целой ячейки:
 а – моделирование электрического сопротивления отдельного зерна;
 б – проекция выводов соединения на грани зерна; в – демонстрация
 соединения отдельных зерен в кубической ячейке

Исходя из объемных долей графита и каучука, предполагается, что элемент проводимости ячейки будет представлять собой группу из трех или более зерен графита, соединенных между собой таким образом, что одно из зерен выходит на одну из граней куба, еще одно выходит на противоположную грань куба, а остальные зерна соединены между собой соседними с зернами на гранях куба. При этом электрическое сопротивление ячейки и емкость в направлении цепочки графита будут неизменны вне зависимости от расположения этой цепочки в пределах куба.

Обсуждение

Электрическое сопротивление ячейки рассматривается как значение электрического сопротивления, измеренного между противоположными гранями куба. Сопротивление одной ячейки будет зависеть от количества составляющих внутреннюю проводящую цепочку зерен. При условии, что сопротивление одного зерна графита равно условной единице (R), сопротивление зерна каучука приближается к бесконечности, сопротивление куба по постоянному

току в направлении, параллельном цепочке графита, будет принимать значение $3R$ (рис. 4,а в направлении вдоль стрелки 1 и рис. 4,б в направлении вдоль стрелки 2) или $4R$ (рис. 4,б в направлении вдоль стрелки 1), в других направлениях ∞R соответственно. Для комбинации из пяти зерен сопротивление может быть равно $3R$ в одном направлении и ∞R , $3R$, $4R$ в других направлениях.

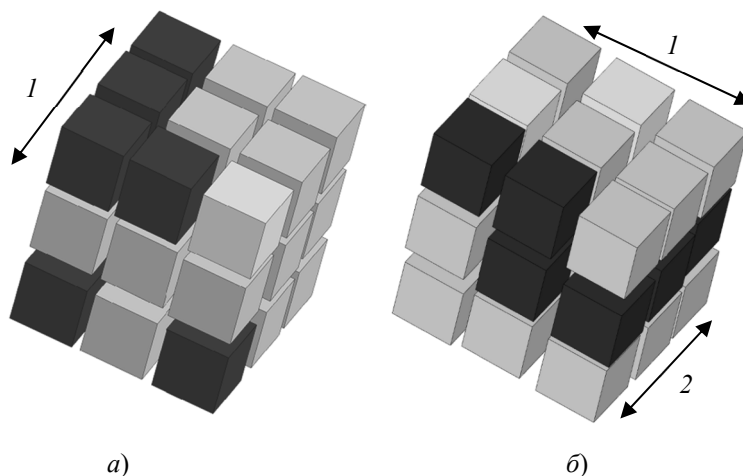


Рис. 4. Модели вариантов взаимного расположения проводящих (темное – графит) и непроводящих (светлое – каучук) зерен кубической ячейки (стрелки показывают направление электрической проводимости для отдельно взятых кубических ячеек)

Согласно предлагаемой модели проводимость между соседними ячейками возможна только при условии, что проводящая грань одной ячейки будет совмещена с проводящей гранью другой ячейки, зерно графита в одном кубе накладывается гранью на зерно графита в другом кубе. Проводимость между ребрами и вершинами зерен и кубов согласно предлагаемой модели невозможна. Зерна, соприкасающиеся с основной цепочкой, но не влияющие на проводимость в основном направлении, учитываются при оценке проводимости соседних элементов. Соседние кубы могут быть смещены относительно друг друга на одно или два зерна в любом направлении. Проводимость в выбранном направлении учитывается только для тех кубов, у которых существует проводимость в данном направлении (рис. 5).

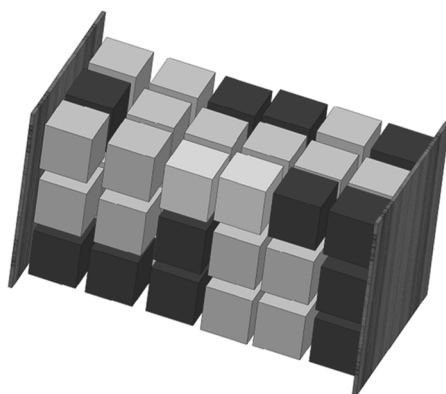


Рис. 5. Демонстрация варианта соединения двух кубических ячеек. Плоскости по краям имитируют внешние электроды

Несмотря на то, что в двух показанных на рис. 5 совмещенных ячейках имеются фрагменты проводящих цепочек, эти цепочки не образуют непрерывной цепи между электродами, следовательно, согласно предлагаемой модели, резистивная проводимость в данной цепи отсутствует. Однако поскольку имеются проводящие и непроводящие фрагменты, то в дальнейшем можно рассматривать емкостную модель проводимости.

Заключение

В работе представлена имитационная графическая модель внутренней структуры токопроводящего полимера, состоящего из двух компонентов – диэлектрической основы и электропроводящего наполнителя. Оба компонента условно представлены в виде кубических зерен, соединенных между собой в кубические ячейки (каждая ячейка состоит из 27 кубических зерен). При задании электрических характеристик для отдельных зерен предложенная модель позволяет оценить теоретическую проводимость материала в цепях постоянного тока. Однако, поскольку биоэлектрические сигналы имеют нестационарный характер, резистивная модель не будет полностью удовлетворять поставленной задаче, поэтому предложенную модель в перспективе необходимо адаптировать для определения проводимости материала в цепях переменного электрического тока. Модель потенциально возможно использовать для определения электрической проводимости других двухкомпонентных токопроводящих полимеров в цепях постоянного и переменного тока.

Список литературы

1. Лопанова Е. А. Функциональные токопроводящие материалы на основе графита и силикатов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2005. 20 с.
2. Демин В. Л. Реологические аномалии в формировании структуры и свойств токопроводящих полимерных композиционных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 20 с.
3. Мелентьев С. В. Резистивный материал на основе углероднаполненного полиуретана : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 18 с.
4. Фанина Е. А. Технология электропроводящих композитных материалов на основе переходных форм углерода : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2018. 35 с.
5. Физиология человека : в 3 т. / под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса ; пер. с англ. Н. Н. Алипова / под ред. П. Г. Костюка. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Мир, 1996.
6. Толкович Д. В. Учебный имитатор электрофизиологических сигналов, выполненный в форме торса человека // Биотехносфера. 2016. № 2. С. 7–11.
7. Ершов Ю. А., Щукин С. И. Основы анализа биотехнических систем: теоретические основы БТС : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 528 с.
8. Щербаченко Л. А. Физика диэлектриков : метод. пособие. Иркутск : ГОУ ВПО ИГУ, 2005. 73 с.
9. Охрана труда в машиностроении : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 1983. 160 с.
10. Бадаев А. С., Чернышов А. В. Физические основы микроэлектроники : учеб. пособие. Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2011. 20 с.
11. Ананьин С. В., Ананьева Е. С., Маркин В. Б. Композиционные материалы : учеб. пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. Ч. 2. 94 с.
12. Физические свойства каучука. 2020. URL: <https://domrezin.ru/physical-properties-of-rubber.html> (дата обращения: 02.11.2022).
13. Графит и углеграфит – строение и свойства. 2007. URL: <http://www.grafitservis.ru/product/grafit> (дата обращения: 02.11.2022).
14. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. М. ; Л. : Энергия, 1965. 892 с.

References

1. Lopanova E.A. Functional conductive materials based on graphite and silicates. PhD abstract. Belgorod, 2005:20. (In Russ.)
2. Demin V.L. Rheological anomalies in the formation of the structure and properties of conductive polymer composite materials. PhD abstract. Moscow, 2005:20. (In Russ.)
3. Melent'ev S.V. Resistive material based on carbon-filled polyurethane. PhD abstract. Tomsk, 2014:18. (In Russ.)
4. Fanina E.A. Technology of electrically conductive composite materials based on transitional forms of carbon. DSc abstract. Belgorod, 2018:35. (In Russ.)
5. Shmidt R., Tevs G. (ed.) *Fiziologiya cheloveka = Human physiology*. Translated from the English by N. N. Alipov. 2nd ed., reprint. and up. Moscow: Mir, 1996. (In Russ.)
6. Tolkovich D.V. Educational simulator of electrophysiological signals, made in the form of a human torso. *Biotehnosfera = Biotechnosphere*. 2016;(2):7–11. (In Russ.)
7. Ershov Yu.A., Shchukin S.I. *Osnovy analiza biotekhnicheskikh sistem: teoreticheskie osnovy BTS: ucheb. posobie = Fundamentals of analysis of biotechnical systems: theoretical foundations of BTS : textbook*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2011:528. (In Russ.)
8. Shcherbachenko L.A. *Fizika dielektrikov: metod. posobie = Physics of dielectrics : methodological guide*. Irkutsk: GOU VPO IGU, 2005:73. (In Russ.)
9. *Okhrana truda v mashinostroenii: ucheb. posobie = Occupational safety in mechanical engineering : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 1983:160. (In Russ.)
10. Badaev A.S., Chernyshov A.V. *Fizicheskie osnovy mikroelektroniki: ucheb. posobie = Physical fundamentals of microelectronics : textbook*. Voronezh: Voronezhskiy gos. tekhnicheskiiy un-t, 2011:20. (In Russ.)
11. Anan'in S.V., Anan'eva E.S., Markin V.B. *Kompozitsionnye materialy: ucheb. posobie = Composite materials : textbook*. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2007;(part 2):94. (In Russ.)
12. *Fizicheskie svoystva kauchuka = Physical properties of rubber*. 2020. (In Russ.). Available at: <https://domrezin.ru/physical-properties-of-rubber.html> (accessed 02.11.2022).
13. *Grafit i uglegrafit – stroenie i svoystva = Graphite and carbon graphite – structure and properties*. 2007. (In Russ.). Available at: <http://www.grafitservis.ru/product/grafit> (accessed 02.11.2022).
14. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey = Theory of radio circuits*. Moscow; Leningrad: Energiya, 1965:892. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Владиславович Толкович
регулирующий радиоэлектронной
аппаратуры и приборов,
Научно-производственное
предприятие «Радар ммс»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Новосельковская, д. 37, лит. А)
E-mail: pyby@inbox.ru

Dmitriy V. Tolkovich
Adjuster radio-technician,
Scientific and Production Enterprise
"Radar mms"
(lit. A, 37 Novoselkovskaya street,
St. Petersburg, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 23.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 21.05.2023

Принята к публикации/Accepted 07.06.2023