



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20>

УДК 621.317.3, 621.389

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО PLA-ПЛАСТИКА

М. В. ЛОБАНОК, И. В. ЧИЖОВ, М. А. ПАВЛЫШКО, А. С. ПОТОЦКИЙ

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики 3D-печатных сенсоров температуры и влажности на основе проводящего PLA-композита с углеродным наполнителем. Установлены связи между морфологией структуры, полученной методом послойного наплавления расплавом, топологией токопроводящих дорожек и частотно-зависимым откликом при изменении температуры и относительной влажности. Показано, что экструзия через сопло и послойное формирование дорожки увеличивают удельное сопротивление одиночного трека в 3–4 раза по сравнению с исходной нитью вследствие межслоевых границ, пористости и частичной перестройки перколяционной сети. Отмечено, что последовательная топология обеспечивает наибольший относительный отклик, тогда как параллельная – минимальное базовое сопротивление. В диапазоне 20–100 °С наблюдается отрицательный температурный коэффициент сопротивления, а при изменении влажности от 40 до 100 % характер сигнала зависит от частоты измерения. Показано, что в области низких и средних частот сопротивление изменяется слабо и преимущественно определяется барьерно-перколяционным переносом, тогда как при 100 кГц может проявляться слабый вклад межфазной поляризации и емкостного шунтирования.

Ключевые слова: 3D-печать, метод послойного наплавления расплавом, сенсор влажности, сенсор температуры, проводящий полилактид, перколяционный композит, углеродный наполнитель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Электрофизические характеристики сенсоров температуры и влажности на основе углеродсодержащего PLA-пластика / М. В. Лобанок [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20>.

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY SENSORS BASED ON CARBON-CONTAINING PLA PLASTIC

MIKHAIL LOBANOK, IHAR CHIZHOV, MIKHAIL PAULYSHKA, ALEKSEI POTOTSKY

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The electrophysical characteristics of 3D-printed temperature and humidity sensors based on a conductive PLA composite with carbon filler are studied. Relationships are established between the morphology of the structure obtained by fused deposition, the topology of the conductive tracks, and the frequency-dependent response to changes in temperature and relative humidity. It is shown that extrusion through a nozzle and layer-by-layer track formation increase the specific resistance of a single track by 3–4 times compared to the original filament due to interlayer boundaries, porosity, and partial rearrangement of the percolation network. It is noted that the serial topology provides the highest relative response, while the parallel topology provides the lowest baseline resistance. A negative temperature coefficient of resistance is observed in the range of 20–100 °C, and as the humidity changes from 40 to 100 %, the nature of the signal depends on the measurement frequency. It is shown that in the low and medium frequency region the resistance changes weakly and is mainly determined by barrier-percolation transport, whereas at 100 kHz a weak contribution of interfacial polarization and capacitive shunting can appear.

Keywords: 3D printing, fused deposition modeling, humidity sensor, temperature sensor, conductive polylactide, percolation composite, carbon filler.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Lobanok M., Chizhov I., Paulyshka M., Pototsky A. (2026) Electrophysical Characteristics of Temperature and Humidity Sensors Based on Carbon-Containing PLA Plastic. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20> (in Russian).

Введение

Аддитивное производство методом послойного наплавления расплавом (Fused Deposition Modeling, FDM) рассматривается как один из наиболее гибких подходов к созданию встроенных и накладных сенсоров сложной геометрии, поскольку позволяет одновременно формировать конструкционный элемент изделия и функциональную чувствительную зону [1–5]. Для датчиков температуры и влажности особое значение имеют технологическая воспроизводимость, возможность управлять топологией токопроводящих дорожек и совместимость сенсорного материала с массовой печатью.

Одним из наиболее доступных материалов для таких задач является полилактид (Poly(lactic) Acid, PLA). Введение углеродного наполнителя переводит PLA из диэлектрического состояния в проводящий перколяционный композит, электрические свойства которого задаются не только рецептурой, но и морфологией расплава после экструзии, степенью диспергирования наполнителя, пористостью, межслоевыми границами и качеством контакта между соседними филаментами [2, 6–12]. Именно эти факторы во многом определяют как абсолютный уровень сопротивления, так и чувствительность материала к температуре, влаге и частоте тестового сигнала.

В научных трудах показано, что проводящий PLA может использоваться как материал для резистивных температурных сенсоров, электрохимических электродов и влагочувствительных структур [1–3, 6, 8, 12]. Однако большинство опубликованных работ сосредоточено либо на рецептуре филамента и активации печатного материала, либо на квазистационарной калибровке сигнала. Существенно слабее исследован вопрос о том, каким образом FDM-индуцированная микроструктура, топология токопроводящих дорожек и частота измерения совместно определяют базовое сопротивление, перекрестную чувствительность к температуре и влажности и форму дисперсионного отклика. Между тем без такого анализа трудно перейти от демонстрации сенсорного эффекта к проектированию воспроизводимых и селективных 3D-печатных датчиков окружающей среды.

В связи с этим целью исследований было установить связь между морфологией 3D-печатных структур PLA-CPC (Carbon-filled Polymer Composite, CPC), топологией токопроводящих дорожек и их электрофизическим откликом при изменении температуры, относительной влажности и частоты измерения. Предполагалось, что увеличение числа межчастичных и межслоевых переходов в последовательной топологии должно усиливать чувствительность за счет суммирования барьерных вкладов, тогда как параллельные токовые пути будут шунтировать локально высокоомные участки и уменьшать вариабельность отклика.

Методика эксперимента

В качестве материала для печати использовали PLA-филамент для основания и коммерческий проводящий PLA-CPC Proto-pasta с углеродным наполнителем и удельным сопротивлением исходной нити $\rho \approx 3,1$ Ом·см. Сенсорные структуры изготавливались методом FDM на 3D-принтере Bambu Lab P1S при диаметре сопла 0,4 мм, высоте слоя 0,2 мм и укладке $0^\circ/90^\circ$. Были реализованы три топологии дорожек: последовательная, параллельная и комбинированная. Ширина проводящих линий задавалась числом проходов сопла – примерно 0,4, 0,8 и 1,6 мм. Площадь контактных площадок составляла 3–10 мм². Электрические характеристики измеряли на импедансметре LRC-76100. Основные данные получали при амплитуде 1 В и частотах 1 и 100 кГц, а также в диапазоне 10 Гц–100 кГц для анализа дисперсии. Температуру варьировали в интервале 22–100 °С с контролем контактным датчиком и тепловизионной обратной связью, относительную влажность – в диапазоне 40–100 % в камере контролируемого увлажнения. Для каждого режима регистрировали временные зависимости до квазистационарного состояния. Воспроизводимость оценивали по серии из 20 идентичных сенсоров; относительное стандартное отклонение сопротивления в одинаковых условиях не превышало ± 4 %.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии напечатанных сенсорных структур на основе PLA-CPC и схема исследованных топологий. На рисунке изображены: общий вид угла сенсора с четко выраженной межслойной адгезией (а); фрагмент прямолинейного проводящего трека, демонстрирующий шероховатость поверхности и следы экструзии (b); перекрестное пересечение дорожек при укладке $0^\circ/90^\circ$, характерное для FDM-печати (c); схема топологий сенсоров: последовательная (верх), параллельная (центр) и комбинированная (низ) (d).

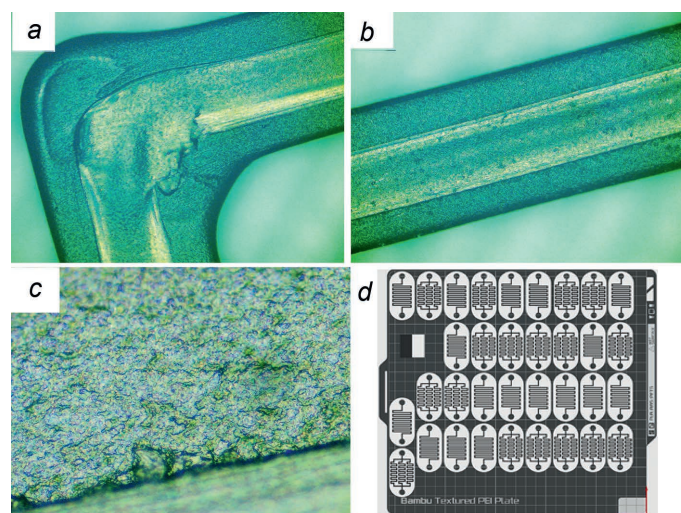


Рис. 1. Микрофотографии сенсорных структур на основе PLA-CPC: *a* – общий вид угла сенсора; *b* – фрагмент прямолинейного проводящего трека; *c* – перекрестное пересечение дорожек при укладке $0^\circ/90^\circ$; *d* – схема топологий сенсоров

Fig. 1. Micrographs of sensor structures based on PLA-CPC: *a* – general view of the sensor corner; *b* – fragment of a rectilinear conductive track; *c* – cross-section of tracks during $0^\circ/90^\circ$ stacking; *d* – diagram of sensor topologies

Рис. 1 важен не только как иллюстрация морфологии, но и как прямое объяснение электрического поведения образцов. На прямолинейных участках дорожек (рис. 1, *b*) отчетливо видны следы экструзии и развитая шероховатость поверхности, что указывает на неоднородность локального распределения наполнителя в затвердевшем расплаве. В областях взаимного перекрытия слоев при укладке $0^\circ/90^\circ$ (рис. 1, *c*) формируется сеть межслойных интерфейсов, которая увеличивает число потенциальных туннельных барьеров и контактных сопротивлений. В угловых зонах (рис. 1, *a*) наблюдаются локальные наплывы материала, связанные с кинематикой печати; такие области способны создавать как шунтирующие, так и ослабленные токовые пути в зависимости от распределения углеродной фазы. Следовательно, уже на уровне микроструктуры FDM-процесс формирует неоднородную перколяционную сеть, что естественным образом объясняет рост удельного сопротивления напечатанного трека по сравнению с исходной нитью.

На рис. 2 приведены температурные и влажностные зависимости сопротивления для сенсоров трех топологий. Исходное сопротивление после печати при комнатной температуре составило 34,8 кОм для последовательной схемы, 6,34 кОм – для параллельной и 6,66 кОм – для комбинированной. Такое соотношение соответствует ожидаемой роли геометрии токового пути: последовательная топология максимизирует эффективную длину проводящего канала, тогда как параллельная формирует набор шунтирующих ветвей. Сопоставление этих данных с морфологией на рис. 1 показывает, что абсолютный уровень сопротивления определяется не только геометрией, но и количеством межслойных и межчастичных переходов, возникающих при печати.

Температурные кривые на рис. 2, *a* демонстрируют монотонное уменьшение сопротивления при нагреве, что соответствует отрицательному температурному коэффициенту сопротивления, характерному для углеродсодержащих перколяционных композитов. Для исследуемых PLA-CPC-структур это означает, что перенос заряда определяется не столько собственной проводимостью углеродной фазы, сколько статистикой межагрегатных зазоров и межслойных контактов, сформированных при FDM-печати.

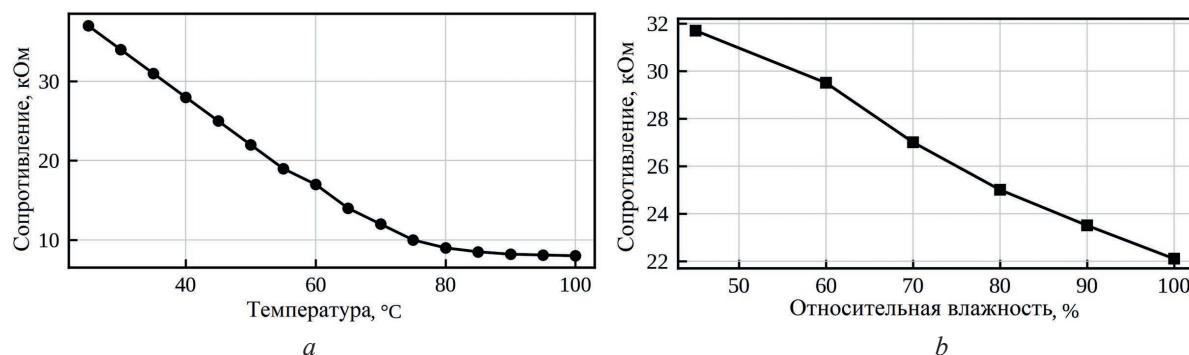


Рис. 2. Зависимость сопротивления сенсоров различных топологий от:
а – температуры; б – относительной влажности

Fig. 2. Dependence of the resistance of sensors of different topologies on: a – temperature; b – relative humidity

При повышении температуры возрастает вероятность термически активируемого туннелирования и прыжкового переноса через тонкие полимерные прослойки между углеродными агломератами, вследствие чего уменьшается суммарное сопротивление наиболее длинного токового пути. Именно поэтому максимальный относительный температурный отклик наблюдается у последовательной топологии: изменение сопротивления отдельных межчастичных переходов в ней не усредняется, а последовательно суммируется вдоль всей проводящей дорожки.

Влажностный отклик на рис. 2, б оказывается не только более сильным, но и физически более сложным. На начальной стадии увлажнения вода адсорбируется в аморфных областях PLA, на стенках пор и на межфазных границах «углеродный наполнитель–полимер», изменяя локальную диэлектрическую проницаемость и параметры межфазной поляризации. При дальнейшем росте влажности возрастает роль мультимолекулярной адсорбции и частичного заполнения межфиламентных полостей, что может одновременно менять эффективное расстояние между агломератами наполнителя и создавать условия для медленного протонно-ионного переноса по адсорбированным водным слоям. Следовательно, влажностный сигнал формируется наложением по меньшей мере двух вкладов – электронно-туннельного и ионно-поляризационного, – тогда как температурный отклик в исследованном диапазоне остается преимущественно барьерно-перколяционным. По этой причине влажность сильнее влияет на сигнал сенсора, а последовательная схема вновь оказывается наиболее чувствительной.

С практической точки зрения полученные данные позволяют более строго интерпретировать роль топологии. Параллельная конфигурация уменьшает вклад отдельных высокоомных контактов за счет шунтирующих ветвей и потому обеспечивает минимальное базовое сопротивление и меньшую восприимчивость к локальным дефектам. Напротив, последовательная топология усиливает вклад каждого межслоевого и межагрегатного перехода, что делает ее предпочтительной для чувствительных датчиков, но одновременно повышает требования к повторяемости печати. Комбинированная схема занимает промежуточное положение и может рассматриваться как инженерный компромисс между чувствительностью и стабильностью.

На рис. 3 показана зависимость сопротивления сенсора с последовательной топологией от частоты в диапазоне 10 Гц–100 кГц.

Как видно из рис. 3, в диапазоне 10 Гц–50 кГц сопротивление сенсора с последовательной топологией изменяется незначительно и остается около значений 34,7–34,9 кОм. Относительное изменение сопротивления в этом диапазоне не превышает ~1 %, что позволяет рассматривать данный участок как квазистационарный резистивный режим. Следовательно, в указанной области частот отклик преимущественно определяется сквозной проводимостью перколяционной сети углеродного наполнителя и межагрегатными туннельными переходами. Наиболее заметное отклонение от среднего уровня наблюдается в области 100 кГц, где сопротивление уменьшается примерно до 34,6 кОм. Это может указывать на появление дополнительного частотно-зависимого вклада, характерного для разупорядоченных композитных систем [13] и связанного с межфазной поляризацией, а также с емкостным шунтированием высокоомных участков перколяционной сети [14]. Однако величина эффекта остается небольшой, поэтому полученную зависимость следует рассматривать как слабую частотную дисперсию, а не как выраженную немонотонную зависимость сопротивления от частоты. Локальные отклонения отдельных точек в области средних

частот не интерпретировались как самостоятельные экстремумы зависимости, поскольку их величина сопоставима с малым относительным изменением сопротивления.

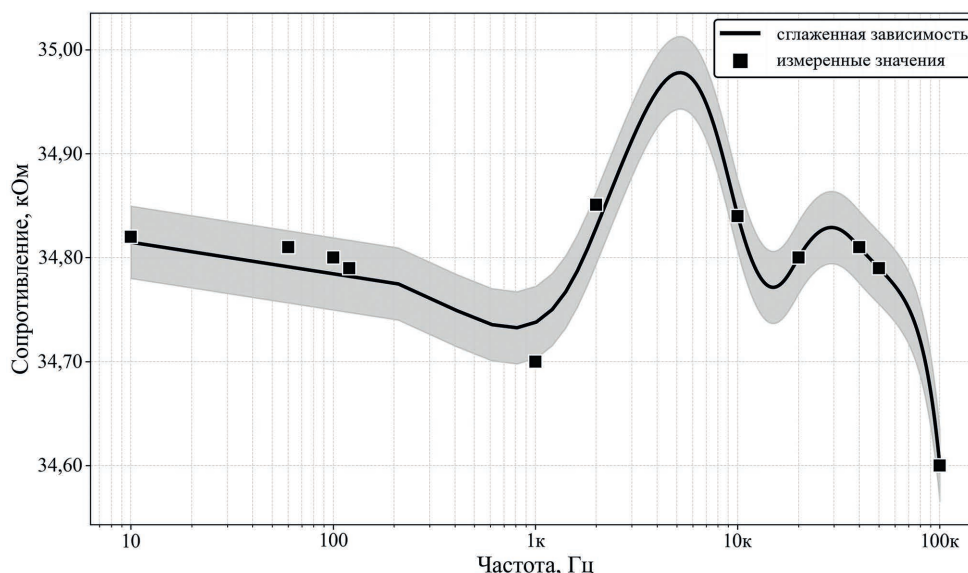


Рис. 3. Зависимость сопротивления сенсора с последовательной топологией от частоты
Fig. 3. Resistance dependence of a sensor with a series topology on frequency

Дополнительную информацию о роли частоты измерения дают частотные зависимости сопротивления сенсора, зарегистрированные при 20 и 50 °С в логарифмическом масштабе (рис. 4).

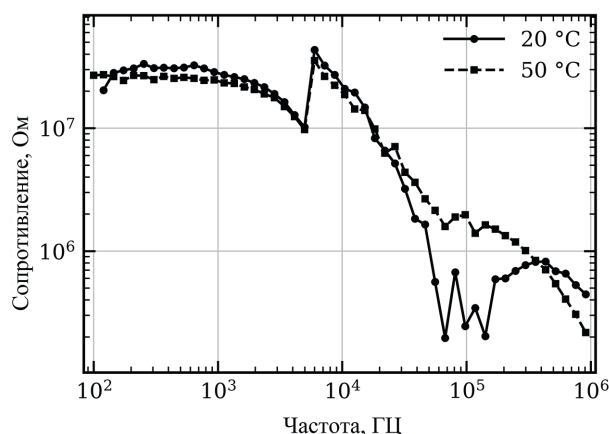


Рис. 4. Частотные зависимости сопротивления сенсора при 20 и 50 °С в логарифмическом масштабе
Fig. 4. Frequency dependences of sensor resistance at 20 and 50 °С plotted on a logarithmic scale

На рис. 4 обе кривые смещаются в область меньших сопротивлений при повышении температуры от 20 до 50 °С. Это согласуется с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, установленным по температурным зависимостям, и указывает на термически активируемый характер переноса заряда через межагрегатные барьеры в перколяционной сети PLA-СРС-композиата. Наиболее заметное различие между кривыми наблюдается в низкочастотной области, где вклад сквозной резистивной проводимости и медленных процессов перераспределения заряда максимален. По мере роста частоты различие между температурными кривыми уменьшается, что указывает на уменьшение относительного вклада медленных барьерно-релаксационных процессов и возрастание роли более быстрых поляризационно-емкостных механизмов.

Таким образом, данные рис. 3 и 4 согласованно показывают, что низкочастотный отклик сенсора преимущественно характеризует барьерно-перколяционную проводимость, тогда как при увеличении частоты возрастает вклад межфазной поляризации и емкостного шунтирования высокоомных участков сети. Это обстоятельство делает многочастотный режим измерения перспективным для последующего разделения температурного и влажностного вкладов в сигнал

сенсора. Вместе с тем полученные результаты следует рассматривать как феноменологическое обоснование такого подхода; для метрологической реализации необходимы дополнительные измерения с большим числом частотных точек, анализом гистерезиса адсорбции-десорбции, циклической повторяемости и с аппроксимацией спектров эквивалентными электрическими схемами.

Заключение

1. Показано, что электрофизический отклик 3D-печатных PLA-СПС-сенсоров определяется совместным действием трех факторов: морфологии, формируемой FDM-процессом, топологии токопроводящих дорожек и частоты измерения. Микроскопические данные свидетельствуют, что шероховатость поверхности, межслоевые интерфейсы и локальные наплывы расплава формируют неоднородную перколяционную сеть, вследствие чего удельное сопротивление напечатанного трека оказывается больше сопротивления исходной нити. Среди исследованных конфигураций последовательная топология обеспечивает максимальную чувствительность, поскольку суммирует изменения на множестве межагрегатных и межслоевых переходов; параллельная минимизирует базовое сопротивление за счет шунтирующих ветвей; комбинированная занимает промежуточное положение и может рассматриваться как компромисс для практической реализации сенсорных узлов.

2. Частотный анализ показал, что в области 10 Гц–50 кГц сопротивление сенсора с последовательной топологией изменяется слабо, что соответствует квазистационарному резистивному режиму, контролируемому перколяционной сетью углеродного наполнителя. При приближении к 100 кГц проявляется дисперсионный вклад, который может быть связан с Maxwell–Wagner–Sillars-поляризацией и емкостным шунтированием высокоомных межагрегатных промежутков. Представление экспериментальных точек без соединения их ломаной линией позволило избежать необоснованной интерпретации слабой частотной дисперсии как сложной немонотонной зависимости. Полученные данные указывают на преимущественно квазистационарный характер сопротивления в диапазоне 10 Гц–50 кГц и на появление слабого высокочастотного вклада при приближении к 100 кГц.

3. Полученные результаты показывают, что температурное воздействие преимущественно изменяет проводимость уже сформированного перколяционного каркаса, тогда как влажность дополнительно влияет на диэлектрическое окружение межчастичных промежутков, межфазную поляризацию и, вероятно, медленные ионно-релаксационные процессы в адсорбированных водных слоях. Поэтому многочастотное измерение является перспективным направлением для разделения температурного и влажностного вкладов в сигнал PLA-СПС-сенсора. Вместе с тем предложенная интерпретация носит феноменологический характер и требует дальнейшей проверки на расширенном наборе частот, при циклическом увлажнении-осушении и с использованием эквивалентных электрических схем.

Список литературы / References

1. Ahmed F., Azhari A., Marzbanrad E., Liravi F., Ali U., Pope M. A., et al. (2019) Graphene Oxide Humidity Sensor Built Entirely by Additive Manufacturing Approaches. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 30, 8980–8988. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01226-y>.
2. Marasso S. L., Cocuzza M., Bertana V., Perrucci F., Tommasi A., Ferrero S., et al. (2018) PLA Conductive Filament for 3D Printed Smart Sensing Applications. *Rapid Prototyping Journal*. 24 (4), 739–743. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0150>.
3. Tirado-Garcia I., Garcia-Gonzalez D., Garzon-Hernandez S., Rusinek A., Robles G., Martinez-Tarifa J. M., et al. (2021) Conductive 3D Printed PLA Composites: On the Interplay of Mechanical, Electrical and Thermal Behaviours. *Composite Structures*. 265. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113744>.
4. Zazoum B., Batooh K. M., Khan M. A. A. (2022) Recent Advances in Flexible Sensors and Their Applications. *Sensors*. 22 (12). <https://doi.org/10.3390/s22124653>.
5. Osman A., Lu J. (2023) 3D Printing of Polymer Composites to Fabricate Wearable Sensors: A Comprehensive Review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 154. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100734>.
6. Stefano J. S., Silva L. R. G., Janegitz B. C. (2022) New Carbon Black-Based Conductive Filaments for the Additive Manufacture of Improved Electrochemical Sensors by Fused Deposition Modeling. *Microchimica Acta*. 189 (11). <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05511-2>.
7. Cieřlik M., Rodak A., Susik A., Wójcik N., Szociński M., Ryl J., et al. (2023) Multiple Reprocessing of Conductive PLA 3D-Printing Filament: Rheology, Morphology, Thermal and Electrochemical Properties Assessment. *Materials*. 16 (3). <https://doi.org/10.3390/ma16031307>.

8. Matsalis S., Paterakis G., Koutroumanis N., Anagnostopoulos G., Galiotis C. (2024) Fabrication and Performance of Capacitive Humidity and Strain Sensors That Incorporate 3D-Printed Nanocomposite Electrodes. *Sensors International*. 5. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100272>.
9. Zhao D., Jia W., Feng X., Yang H., Xie Y., Shang J., et al. (2024) Flexible Sensors Based on Conductive Polymer Composites. *Sensors*. 24 (14). <https://doi.org/10.3390/s24144664>.
10. Silva M. V. C. O., Carvalho M. S., Silva L. R. G., da Rocha R. G., Cambraia L. V., Janegitz B. C., et al. (2024) Tailoring 3D-Printed Sensor Properties with Reduced Graphene Oxide: Improved Conductive Filaments. *Microchimica Acta*. 191 (10). <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06720-7>.
11. Wiśniewska P., Łepek A., Ryl J., Khodadadi Yazdi M. (2025) Additive Manufacturing of Electrically Conductive Polymers: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Chemistry C*. 13 (42), 21302–21332. <https://doi.org/10.1039/D5TC02571K>.
12. Staffa A., Krivic G., Tocci M., Palmieri M., Cianetti F., Slavič J. (2025) Three-Dimensionally Printed Temperature Sensors Based on Conductive PLA Materials. *Sensors*. 25 (20). <https://doi.org/10.3390/s25206348>.
13. Jonscher A. K. (1977) The “Universal” Dielectric Response. *Nature*. 267, 673–679. <https://doi.org/10.1038/267673a0>.
14. Samet M., Kallel A., Serghei A. (2022) Maxwell-Wagner-Sillars Interfacial Polarization in Dielectric Spectra of Composite Materials: Scaling Laws and Applications. *Journal of Composite Materials*. 56 (20), 3197–3217. <https://doi.org/10.1177/00219983221090629>.

Поступила 09.03.2026
Received: 9 March 2026

Принята в печать 17.04.2026
Accepted: 17 April 2026

Вклад авторов

Лобанок М. В. разработал концепцию исследования, руководил работой, выполнил анализ электрофизических механизмов отклика, подготовил текст статьи.

Чижов И. В. изготовил сенсорные структуры методом FDM-печати, провел измерения температурных и влажностных зависимостей, выполнил обработку экспериментальных данных.

Павлышко М. А. разработал методику импедансных измерений, обеспечил метрологическое сопровождение эксперимента, выполнил частотный анализ отклика сенсоров.

Потоцкий А. С. участвовал в подготовке образцов, проведении оптической микроскопии и первичной обработке результатов.

Authors' contribution

Lobanok M. developed the research concept, supervised the study, analyzed the electrophysical response mechanisms, prepared the manuscript.

Chizhov I. fabricated sensor structures by FDM printing, performed temperature and humidity dependence measurements, and processed experimental data.

Paulyshka M. developed the impedance measurement methodology, provided metrological support for the experiments, and performed frequency-dependent response analysis.

Pototsky A. participated in sample preparation, optical microscopy, and preliminary data processing.

Сведения об авторах

Лобанок М. В., канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физической электроники и нанотехнологий, Белорусский государственный университет (БГУ)

Чижов И. В., асп. каф. физической электроники и нанотехнологий, БГУ

Павлышко М. А., науч. сотр. НИЛ информационно-измерительных систем, БГУ

Потоцкий А. С., студент, БГУ

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 654-09-53
E-mail: LobanokMV@bsu.by
Лобанок Михаил Владимирович

Information about the authors

Lobanok M., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, Belarusian State University (BSU)

Chizhov I., Postgraduate of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, BSU

Paulyshka M., Researcher at the Research Laboratory of Information and Measuring Systems, BSU

Pototsky A., Student, BSU

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 29 654-09-53
E-mail: LobanokMV@bsu.by
Lobanok Mikhail