

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.372:621.317.4:616.12-073.7

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).780-787

ГРНТИ 45.53.49+76.13.15

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХАРВЕСТЕР В СИСТЕМЕ МАГНИТОКАРДИОГРАФА

Лобекин В. Н.¹, Ивашева Е. Е.¹, Кафаров Р. Г.¹,
Карачинов В. А.¹, Кондрашов А. Г.², Бичурин М. И.¹

¹Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)

²АО "НПО "КВАНТ" (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной работе исследован магнитоэлектрический харвестер для биомедицины на основе магнитострикционно-пьезоэлектрической композитной структуры АМАГ-ЦТС. Активное развитие современной электроники приводит к комплексному теоретическому и экспериментальному исследованию новых материалов, в которых проявляется связь между их магнитными и электрическими свойствами, а именно – магнитоэлектрический эффект (МЭ). МЭ харвестер для биомедицины, подключенный параллельно МЭ датчику, является частью полноценного высокочувствительного устройства для магнитокардиографии и выполняет роль резервного источника питания, собирая и запасая энергию для питания генератора, являющегося источником переменного магнитного поля для МЭ датчика магнитного поля. Было проведено экспериментальное исследование МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрической композитной структуре харвестера, получены зависимости выходного напряжения и МЭ коэффициента композитной структуры от частоты.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, харвестер, композитная структура, магнитокардиография, биомедицина

Для цитирования: Лобекин В. Н., Ивашева Е. Е., Кафаров Р. Г., Карачинов В. А., Кондрашов А. Г., Бичурин М. И. Магнитоэлектрический харвестер в системе магнитокардиографа // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 780-787. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).780-787

Research Article

MAGNETOELECTRIC HARVESTER IN THE MAGNETOCARDIOGRAPH SYSTEM

Lobekin V. N.¹, Ivasheva E. E.¹, Kafarov R. G.¹,
Karachinov V. A.¹, Kondrashov A. G.², Bichurin M. I.¹

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

²AO Research and Production Association Kvant (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract In this work, a magnetoelectric harvester for biomedicine based on the AMAG-PZTS magnetostrictive-piezoelectric composite structure is investigated. The intense development of modern electronics leads to a comprehensive theoretical and experimental study of new materials in which the connection between their magnetic and electrical properties is manifested, namely the magnetoelectric effect (ME). The ME harvester for biomedicine, connected in parallel to the ME sensor, is part of a full-fledged highly sensitive device for magnetocardiography and acts as a backup power source, collecting and storing energy to power the generator which is a source of alternating magnetic field for the ME magnetic field sensor. An experimental study of the ME effect in the magnetostrictive-piezoelectric composite structure of the harvester was carried out, and the dependences of the output voltage and ME coefficient of the composite structure on frequency were obtained.

Keywords: magnetoelectric effect, harvester, composite structure, magnetocardiography, biomedicine
magnetoelectric effect, harvester, composite structure, magnetocardiography, biomedicine

For citation: Lobekin V. N., Ivasheva E. E., Kafarov R. G., Karachinov V. A., Kondrashov A. G., Bichurin M. I. Magnetoelectric harvester in the magnetocardiograph system // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 780-787. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).780-787

Введение

За последнее десятилетие значительные достижения в микроэлектронике стимулировали развитие в разработке биомедицинских устройств, которые могут улучшить качество человеческой жизни. Исследованию МЭ датчиков для биомедицины и электронных устройств, которые могут применяться для магнитокардиографии или магнитоэнцефалографии, посвящено большое количество работ.

Датчики произвели революционные изменения в области биомедицинской диагностики и применения электроники в медицине и оказывают положительное влияние на качество жизни человека в XXI веке. Обзор неинвазивных методов и магнитных датчиков, применяемых в биомедицине, представлен в [1]. Обзор композитных структур магнитоэлектрических датчиков, применяемых, в том числе, и в биомедицине представлен в [2]. В [3] представлены результаты исследований биомедицинских датчиков и измерений на их основе, в том числе МЭ датчики, способные преобразовывать биологические сигналы человеческого организма в легко измеряемые электрические сигналы. В [4, 5] рассмотрен МЭ магнитокардиограф – малогабаритное высокочувствительное устройство, способное регистрировать изменения во времени магнитной составляющей электродвижущей силы сердца. Магнитоэлектрический датчик для магнитокардиографических исследований представлен в [6, 7].

Помимо интереса к исследованию и разработке биомедицинских устройств различного применения, особый интерес уделяется исследованию и разработке харвестеров – устройств сбора энергии, с возможностью применения данных устройств в биомедицине. В работе [9] рассмотрены пьезоэлектрические харвестеры для биомедицинских применений: преобразование механических движений человеческого тела, таких как, колебания легких/сердца, кровообращения и сокращения мышц, в электрическую энергию; в датчиках артериального давления в качестве автономного питания; в датчиках кардиологических исследований (электрокардиография и магнитокардиография); в датчиках пульса в качестве автономного питания; в акустическом датчике для биомиметических искусственных волосковых клеток; в датчиках давления и тензодатчиках и др.

В данной работе рассмотрен МЭ харвестер для биомедицины, как часть высокочувствительного устройства (магнитокардиографа). В качестве чувствительного элемента МЭ харвестера рассматривается магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура АМАГ-ЦТС, проведено экспериментальное исследование МЭ эффекта в данной структуре, проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных.

Магнитоэлектрический магнитокардиограф

Еще в 1963 г. была записана первая магнитокардиограмма (МКГ) Baule and McFee [8]. Способ измерения магнитного поля сердца человека осуществлялся с помощью пары медных индукционных катушек вокруг ферромагнитного сердечника при комнатной температуре в неэкранированном окружении. В настоящее время бесконтактная визуализация или мониторинг биологических объектов с помощью детектирования слабых магнитных полей стали новой областью развития МЭ датчиков. По сравнению с широко используемыми сверхпроводящими устройствами квантовой интерференции (SQUID), требующими охлаждения жидким гелием и магнитометрами с оптической накачкой (OPM), страдающими от пропускной способности и масштабируемости, магнитоэлектрические датчики магнитного поля предлагают пассивное и, следовательно, маломощное обнаружение, высокую чувствительность, компактную структуру, а также большой динамический диапазон.

МЭ магнитокардиограф представляет собой устройство, состоящее из измерительного блока (МЭ датчик магнитного поля, МЭ харвестер, малошумящий усилитель); блока цифровой обработки сигнала (преобразователи сигнала, пиковый детектор, программируемый генератор сигналов, быстродействующие операционные усилители, инструментальный усилитель и АЦП); блока беспроводной связи (приемная и передающая антенна). МЭ датчик магнитного поля за счет своей высокой чувствительности детектирует изменяемую во времени магнитную составляющую электродвижущей силы сердца и передает эти данные на малошумящий усилитель. Усиленный сигнал передается на блок цифровой обработки сигнала и за счет блока беспроводной связи передается в интерфейс LabView.

Структурная схема магнитоэлектрического магнитокардиографа с МЭ харвестером представлена на рисунке 1.

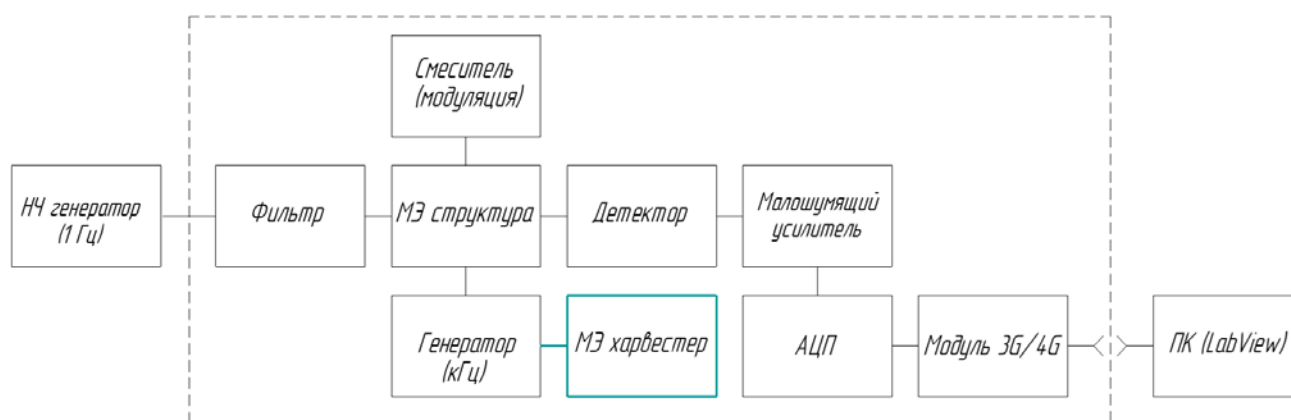


Рисунок 1. Структурная схема МЭ магнитокардиографа с МЭ харвестером

Магнитоэлектрический харвестер

МЭ харвестер в системе МЭ магнитокардиографа может выполнять функцию резервного и автономного питания. За счет сильной связи между магнитострикционным и пьезоэлектрическим материалами МЭ композитные структуры можно рассматривать как сборщики различной энергии, в частности энергии магнитного поля. Принцип работы МЭ харвестера заключается в воздействии внешнего магнитного поля на магнитострикционно-пьезоэлектрическую структуру, за счет чего на электродах пьезоэлектрика индуцируется электрическое напряжение. Благодаря пьезоэлектрическому эффекту внешнее механическое давление также приводит к появлению на электродах пьезоэлектрика электрического напряжения. В результате выходное напряжение оказывается пропорционально как внешнему магнитному полю, так и внешнему механическому давлению. При этом величина выходного напряжения максимальна, если частота внешних воздействий совпадает с частотой электромеханического резонанса МЭ структуры.

МЭ харвестеры в будущем смогут заменить аккумуляторы, которые на текущий момент являются наиболее надежным источником питания для носимых и имплантируемых биомедицинских устройств, но из-за ограничений современной технологии трудно достичь максимального уровня миниатюризации аккумуляторных систем. Также ограниченный срок службы батарей является важной проблемой. Например, срок службы батарей, используемых для генерации электрических импульсов в кардиостимуляторах составляет от 3 до 5 лет, что в дальнейшем подразумевает замену аккумулятора. МЭ харвестеры могут решить данные проблемы. К тому же применение МЭ структуры в харвестере может снизить потери энергии благодаря своей высокой добротности.

Чувствительным элементом МЭ харвестера является структура на основе магнитострикционного аморфного материала на основе железа-никеля – АМАГ 225 и пьезоэлектрического керамического материала ЦТС-19. Размер структуры – 30х10х0,5 мм, 14 слоев АМАГ 225, по 7 с каждой стороны пластины ЦТС-19, соединенные клеем БФ-2. В процессе создания производилась сушка образца под прессом при температуре 100 °С в течение часа. Структура представлена на рисунке 2.

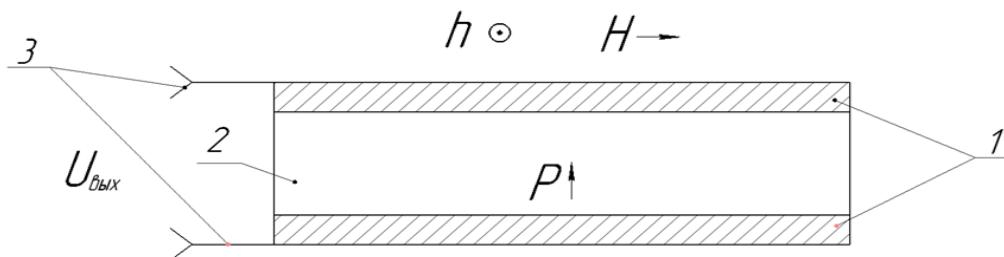


Рисунок 2. Магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура МЭ харвестера: 1 – магнитострикционный материал АМАГ 225; 2 – пьезоэлектрический материал ЦТС-19; 3 – электроды

Было проведено экспериментальное исследование МЭ эффекта в магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре, получены зависимости выходного напряжения и МЭ коэффициента композитной структуры от частоты, представленные на рисунках 3 и 4.

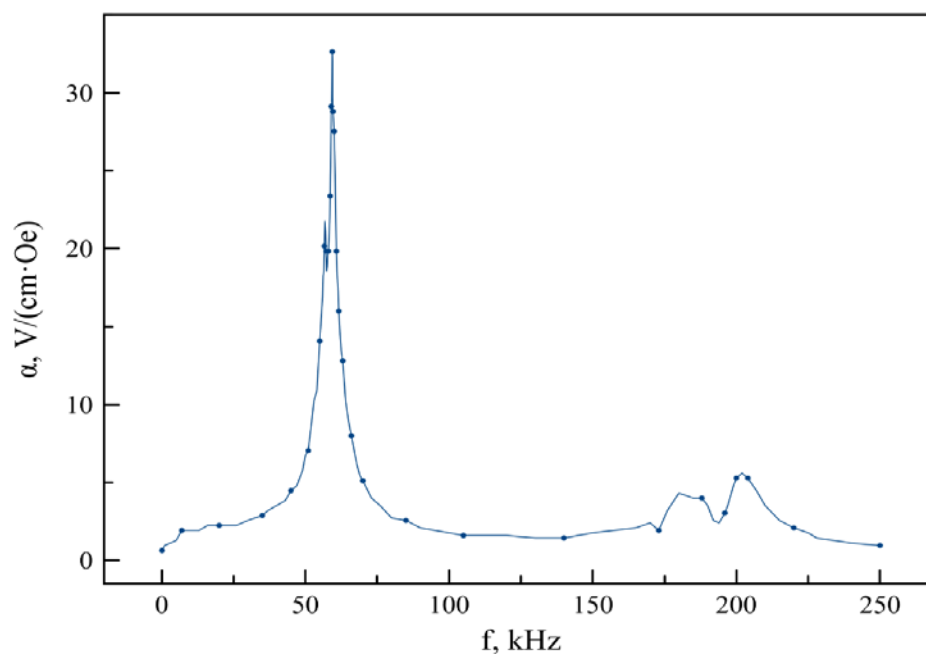


Рисунок 3. Зависимость магнитоэлектрического коэффициента от частоты

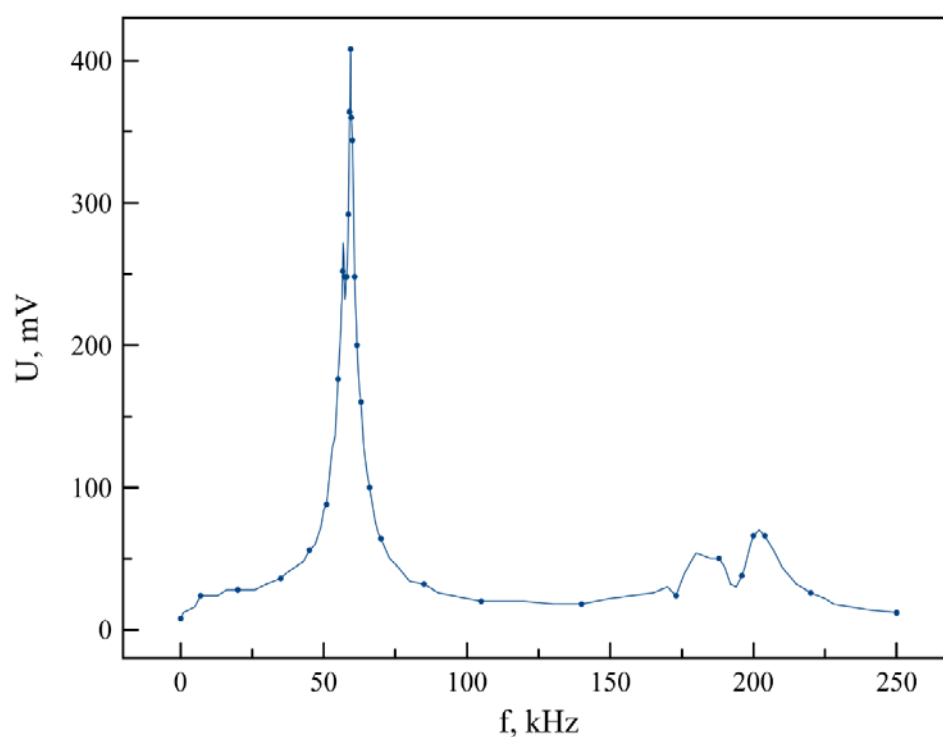


Рисунок 4. Зависимость выходного напряжения от частоты

Экспериментальные зависимости получены на резонансной частоте $f=59,4$ кГц. Максимальное выходное напряжение составило $U=0,4$ мВ, а МЭ коэффициент $\alpha=32,64$ В/(см*Э).

Зная средние электромагнитные характеристики сердечных колебаний [10] и полученные значения МЭ коэффициента, необходимо в схему харвестера включить конденсатор для запасаения энергии от сердечных колебаний пациента, тем самым МЭ харвестер сможет выполнять функцию резервного источника питания.

Поскольку экспериментальные зависимости получены на резонансной частоте $f=59,4$ кГц, а частота магнитного поля сердца располагается в диапазоне $0,1$ Гц – 1 Гц, для эффективного взаимодействия частотных сигналов структуры МЭ харвестера и сердечной деятельности, необходимо использовать методы модуляции, а именно – электрическую модуляцию сигнала. Для этого необходимо в систему МЭ харвестера добавить малощумящий операционный усилитель в конфигурации с единичным коэффициентом усиления, для предварительного усиления выходного сигнала, а также использовать демодуляционный фильтр, что даст возможность использования приведенной структуры МЭ харвестера для сбора и хранения энергии магнитного поля сердца.

Заключение

В статье рассмотрен МЭ харвестер для системы магнитокардиографа, чувствительным элементом которого является магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура АМАГ – ЦТС. Проведено экспериментальное исследование МЭ эффекта в данной структуре, получены зависимости магнитоэлектрического коэффициента и выходного напряжения от частоты. Полученные результаты показывают возможность сбора энергии переменного магнитного поля сердечных колебаний с помощью магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры. С учетом развития современных тенденций электроники, очевидно, что необходимо искать новые пути получения электрической энергии. Одним из таких устройств как раз является МЭ харвестер. Активное изучение и внедрение такого типа устройств открывает широкие возможности применения МЭ харвестеров в биомедицине, в частности, в магнитокардиографии.

В дальнейшем планируется провести дополнительное исследование других магнитострикционных и пьезоэлектрических материалов с использованием градиентной структуры Ni-АМАГ для увеличения магнитной чувствительности и снижения магнитных шумов МЭ харвестера.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-25-20224.

Список литературы

1. Li Y., Cheng H., Alhalili Z., Xu G., Gao G. The progress of magnetic sensor applied in biomedicine: A review of non-invasive techniques and sensors // Journal Chinese Chemical Society Taipei. 2021. 68(24). 216-227. DOI: 10.1002/jccs.202000353
2. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors. 2021. 21(18). 6232. DOI: 10.3390/s21186232
3. Wang P., Liu Q. Biomedical Sensors and Measurement. Advanced Topics in Science and Technology in China. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 300 p. DOI: 10.1007/978-3-642-19525-9
4. Leontiev V. S., Lobekin V. N., Saplev A. F., Ivasheva E. E., Zueva E. A., Bichurin M. I. Application of magnetoelectric sensors in biomedicine // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012022
5. Лобекин В. Н. Магнитоэлектрический магнитокардиограф // Сборник тезисов, материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26.2): материалы конференции, тезисы докладов, Ростов-на-Дону, 25-26 марта 2022 г.: в 2 т. Т. 2. Ростов-на-Дону, 2022. С. 51-52.
6. Jahns R., Knöchel R., Greve H., Woltermann E., Lage E., Quandt E. Magnetoelectric sensors for biomagnetic measurements // IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, 30-31 May 2011. Bari, Italy, 2011. P. 107-110. DOI: 10.1109/MEMEA.2011.5966676
7. Reermann J., Durdaut P., Salzer S., Demming T., Piorra A., Quandt E., Frey N., Höft M., Schmidt G. Evaluation of magnetoelectric sensor systems for cardiological applications // Measurement. 2018. 116. 230-238. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.09.047
8. Alia F., Razab W., Lic X., Guld H., Kime K.-H. Piezoelectric Energy Harvesters for Biomedical Applications // Nano Energy. 2019. 57. 879-902. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.01.012
9. Baule G., McFee R. Detection of the magnetic field of the heart // American Heart Journal. 1963. 66(1). 95-96. DOI: 10.1016/0002-8703(63)90075-9
10. Newmarker C. The Secrets of Harnessing Electricity from a Beating Heart // MD+DI: website. 2014. URL: <https://www.mddionline.com/secrets-harnessing-electricity-beating-heart> (Дата обращения: 16.10.2023).

References

1. Li Y., Cheng H., Alhalili Z., Xu G., Gao G. The progress of magnetic sensor applied in biomedicine: A review of non-invasive techniques and sensors // Journal Chinese Chemical Society Taipei. 2021. 68(24). 216-227. DOI: 10.1002/jccs.202000353
2. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors. 2021. 21(18). 6232. DOI: 10.3390/s21186232
3. Wang P., Liu Q. Biomedical Sensors and Measurement. Advanced Topics in Science and Technology in China. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 300 p. DOI: 10.1007/978-3-642-19525-9

4. Leontiev V. S., Lobekin V. N., Saplev A. F., Ivasheva E. E., Zueva E. A., Bichurin M. I. Application of magnetoelectric sensors in biomedicine // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012022
5. Lobekin V. N. Magnitoelektricheskii magnitokardiograf [Magnetoelectric magnetocardiograph] // Sbornik tezisov, materialy Dvadtsat' shestoi Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov-fizikov i molodykh uchenykh (VNKSF-26.2) [Proc. 26th All-Russian Sci. Conf. of Physics Students and Young Scientists (VNKSF-26.2)]. In 2 vols. Vol. 2. Rostov-on-Don, 2022. P. 51-52.
6. Jahns R., Knöchel R., Greve H., Woltermann E., Lage E., Quandt E. Magnetoelectric sensors for biomagnetic measurements // IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, 30-31 May 2011. Bari, Italy, 2011. P. 107-110. DOI: 10.1109/MEMEA.2011.5966676
7. Reermann J., Durdaut P., Salzer S., Demming T., Piorra A., Quandt E., Frey N., Höft M., Schmidt G. Evaluation of magnetoelectric sensor systems for cardiological applications // Measurement. 2018. 116. 230238. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.09.047
8. Alia F., Razab W., Lic X., Guld H., Kime K.-H. Piezoelectric Energy Harvesters for Biomedical Applications // Nano Energy. 2019. 57. 879-902. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.01.012
9. Baule G., McFee R. Detection of the magnetic field of the heart // American Heart Journal. 1963. 66(1). 95-96. DOI: 10.1016/0002-8703(63)90075-9
10. Newmarker C. The Secrets of Harnessing Electricity from a Beating Heart // MD+DI: website. 2014. Available at: <https://www.mddionline.com/secrets-harnessing-electricity-beating-heart> (Accessed: 16.10.2023).

Информация об авторах

Лобекин Вячеслав Николаевич – инженер, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-4896-2191, s203878@std.novsu.ru

Ивашева Елена Евгеньевна – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-4492-4137, s246709@std.novsu.ru

Кафаров Руслан Гайдарович – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-3707-1585, s247012@std.novsu.ru

Карачинов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru

Кондрашов Андрей Геннадьевич – генеральный директор АО "НПО "КВАНТ" (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9846-2489, kondrashovag@mail.ru

Бичурин Мирза Имамович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0650-4712, Mirza.Bichurin@novsu.ru