

УДК 621.3.051:629.3.064.5
DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-27-31

Ф. Р. ИСМАГИЛОВ
В. Е. ВАВИЛОВ
Р. А. НУРГАЛИЕВА
А. Х. МИНИЯРОВ

Уфимский государственный
авиационный технический университет,
г. Уфа

УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АППАРАТОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

В статье рассматриваются вопросы, проблемы и методы их решения, связанные с передачей энергии трансплантируемым устройствам вспомогательного кровообращения, позволяющим обеспечивать эффективную, безопасную и стабильную передачу энергии. Одним из перспективных методов передачи энергии является беспроводная система чрескожной передачи энергии, которая способствует пациентам с имплантируемыми аппаратами вести более активную жизнь, избегая заражения и отторжения аппаратов.

Ключевые слова: чрескожная передача энергии, беспроводная система передачи энергии, аппарат вспомогательного кровообращения, сердечный насос.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00562 А.

Введение. Как в России, так и во всем мире проблемы сердечно-сосудистых заболеваний являются основными причинами преждевременной, ранней смерти населения. Единственным решением для сохранения жизни пациентов с крайней степенью сердечной недостаточности является трансплантация донорского органа. Однако часто отсутствует подходящий орган, и тогда возникает необходимость устройства, аналогичного по своим свойствам и функциям с работой сердца. Одним из таких аналогов могут служить механические устройства, такие как аппараты вспомогательного кровообращения, заменяющие насосную функцию сердца или поддерживающие на время восстановления миокарда.

Аппараты вспомогательного кровообращения представляют собой набор устройств, функционирующих как одно целое (рис. 1). Основные элементы:

- источник питания (аккумуляторные батареи);
- преобразователь энергии (электрической в механическую);
- насос (осевой или центробежный);
- система управления (контроллер).

Такое исполнение устройств может быть имплантируемым и гибким в использовании, а также

может быть стационарным, экстракорпоральным, не позволяющим покидать стены медицинского учреждения. В настоящее время наиболее оптимальными и эффективными становятся портативные аппараты вспомогательного кровообращения, которые позволяют вести пациентам активную жизнь. Однако многое зависит от источника питания, который чаще всего представляет собой несколько аккумуляторных батарей, носимых в дополнительном чехле и передающих энергию через провод. Такой способ передачи энергии иногда становится проблемой, так как возникают осложнения, связанные с инфицированием и заражением крови через чрескожные провода. Вероятность таких инфекций составляет порядка 40–45 % [2]. Соответственно, перед медицинскими специалистами и учеными-исследователями возникает задача создания такой системы передачи энергии, которая способна обеспечить бесперебойное питание с минимальными действиями на состав крови и ее структуру, а также минимальными размерами и безопасными эксплуатационными параметрами. Таких условий позволяет достигать беспроводная система передачи электрической энергии имплантируемым медицинским приборам.

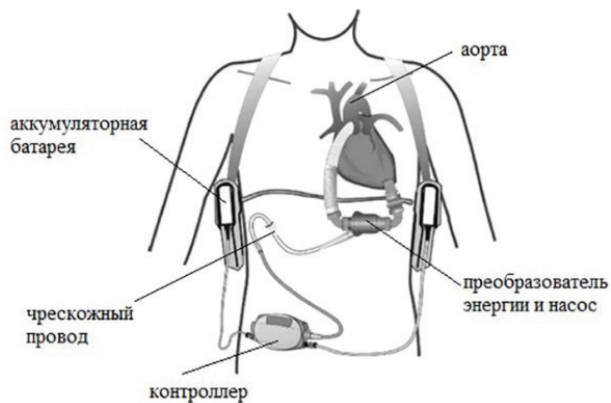


Рис. 1. Составляющие аппаратов вспомогательного кровообращения [1]

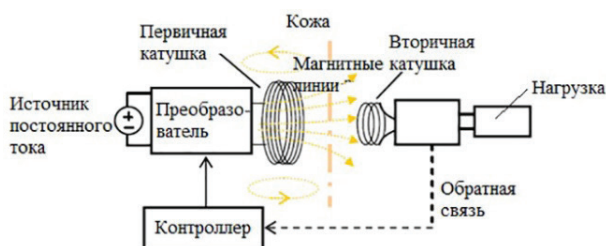


Рис. 2. Принципиальная схема чрескожной передачи [4]

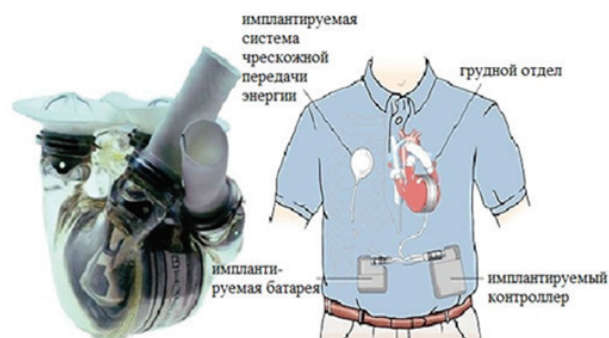


Рис. 3. Реализация чрескожной передачи энергии для устройства AbioCor компании ABIOMED [6]

Основы беспроводной передачи мощности включают передачу энергии от первичного контура ко вторичному через колебательное магнитное поле. От источника питания передается постоянный ток, который проходит через преобразователь и становится переменным. Переменный ток активизирует магнитное поле во вторичной катушке и снова преобразуется в постоянный, который затем подается на нагрузку [3]. Нагрузка представляет собой имплантируемую систему, состоящую из сердечного насоса и привода, которым служит электрический двигатель.

Расстояние между катушками зависит от того, резонируют ли они на одной и той же частоте или нет. Такой вид энергопередачи позволит уменьшить затраты на комплектующие по проводной передаче, обеспечить безопасность и удобство подзарядки внутренних устройств, герметичность и отсутствие

взаимодействия с кислородом, что приводило бы к окислениям и ржавлению частей изделия.

Перспективы развития систем передачи энергии аппаратам вспомогательного кровообращения. На сегодняшний день перспективным направлением является разработка методов чрескожной передачи энергии, благодаря электромагнитным, инфракрасным, оптическим, индуктивным связям. Основной принцип передачи энергии чрескожным методом заключается в следующем: имеется две катушки, которые располагаются соосно друг относительно друга, в передающей катушке формируется переменное магнитное поле, индуцируя при этом ток в приемной катушке, а затем выпрямленный передается на нагрузку (аппарат вспомогательного кровообращения). Приблизительное расстояние между катушками составляет порядка 10–20 мм.

Однако по сравнению с существующими методами передачи энергии с помощью проводов системы чрескожной передачи энергии имеют также некоторые недостатки, которые требуют проработки и корректировки методов. Один из них — это изменение положения катушек относительно друг друга, связанное с изменениями в теле человека (отеки, изменения осанки, смещение). А также невозможность регулирования мощности, передаваемой на нагрузку. При недостатке мощности устройство работает некорректно, а при избытке выделяется «ненужное» количество тепла, подвергаящее ткани организма изменениям.

Первая успешная демонстрация возможности беспроводной передачи энергии через слой кожи была осуществлена в 1960 г. группой американских ученых (рис. 2). Рабочая частота системы составляла 400 кГц, передающая и приемная катушки имели одинаковые размеры (внутренний диаметр 55 мм, внешний 100 мм, толщина 15 мм), индуктивность катушек равнялась 470 мГн, обмотка катушек состояла из 65 витков провода литцендрата. Толщина слоя кожи между катушками составляла 30 мм. При экспериментальных исследованиях удалось достичь мощности 50 и 69 Вт [4, 5].

Замена чрескожного кабеля на беспроводную систему передачи энергии считается идеальным решением для исключения инфекционных заражений. Имплантируемое устройство AbioCor (рис. 3) компании ABIOMED является первым полностью имплантируемым устройством поддержки кровообращения с технологией чрескожной передачи энергии [6].

Эта система протестирована и испытана на людях в 2001 году. Система состоит из имплантированной приемной катушки и аккумуляторной батареи, которая может поддерживать связь на расстоянии до 20 мм. Имплантируемый блок электроники отслеживает и контролирует работу сердца, исходя из физиологических потребностей пациента. AbioCor работает как на внутренних, так и на внешних литиевых батареях. Внутренняя имплантированная батарея постоянно заряжается с внешней консоли или с основного внешнего аккумулятора. Внутренние батареи AbioCor рассчитаны на полчаса при имплантации, что позволяет пациентам проводить такие мероприятия, как прием душа, без внешнего источника питания или аккумуляторной батареи. Внешний аккумулятор может быть использован ограниченное количество времени, которое зависит от количества переносимых батарей.

Известна работа израильской компании Leviticus Cardio и фирмы Jarvik Heart, которые создали

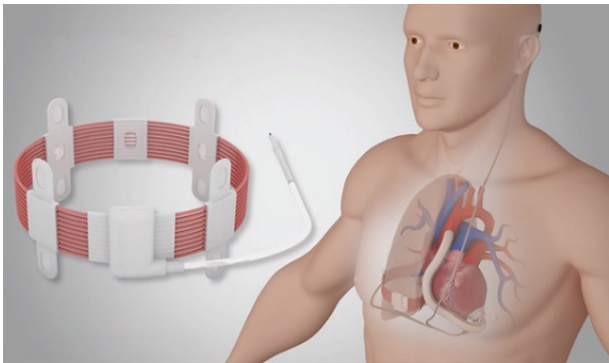


Рис. 4. Реализация CET передачи [7]

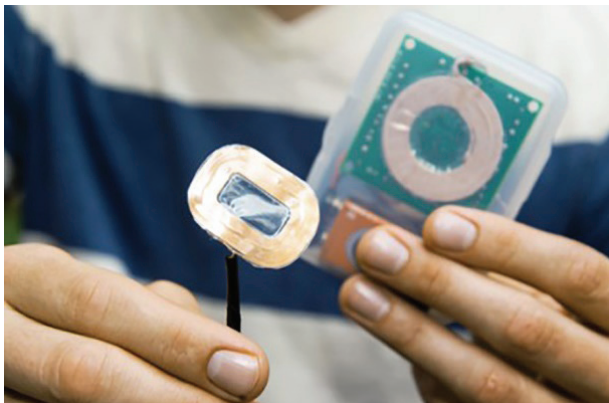


Рис. 5. Устройство с системой tCoil [9]

и установили имплантируемое устройство Jarvik 2000 VAD, с использованием копланарной передачи энергии (рис. 4) (Coplanar Energy Transfer (CET)) для работы устройства [8]. Информация об этой технологии опубликована в The Journal of Heart and Lung Transplantation.

Беспроводная система передачи энергии CET состоит из кольцевой катушки, располагаемой вокруг легкого человека, закрепленной к грудной клетке, а также внутренней батареи и контроллера, ремней «жилета», в которых располагается передающая катушка. Также система включает внешний источник энергии (внешняя батарея) и контроллер, а также «умные» часы, реагирующие на любое изменение системы и уведомляющие об этом пациента. Помимо CET предусмотрена и резервная система передачи энергии с помощью соединяющих проводов. Эта система позволяет использовать любой аппарат вспомогательного кровообращения, который нуждается в подаче постоянной мощности до 30 Ватт. Благодаря такой системе пациент может вести более подвижный образ жизни, так как внутренний аккумулятор позволяет использовать устройство от 6 до 8 часов без внешних устройств [7].

Исследователями Райсовского университета предлагается устройство, которое может питать сердечные насосы без использования проводов. Передаваемую энергию в этих устройствах называют системой tCoil (рис. 5). Эта энергия передается через две индукционные катушки, одна из которых находится под кожей человека, а вторая — в специальной сумке, носимой на теле. Обе катушки соединены с аккумуляторами, так что энергия из внешнего аккумулятора перетекает

во внутренний без использования проводов. Заряда внутренней батареи хватает на три часа автономной работы насоса [9]. Также данная система помимо электроэнергии передает и информацию. Такая технология позволяет удаленно следить за состоянием пациента и избежать летальных случаев вследствие выхода устройства из строя.

На стабильность передачи энергии влияет расположение катушечных групп относительно друг друга. Поэтому рассмотрим способ передачи энергии, который позволит работать устройствам даже в случае их сдвига.

Научные сотрудники кафедры нанофотоники и метаматериалов университета ИТМО предлагают для беспроводной передачи энергии использовать керамические резонаторы. Такой прибор способен передавать энергию на расстоянии до 10 см. Результаты исследования опубликованы в журнале Applied Physics Letters [10].

Учеными использовались диэлектрические резонаторы сферической формы из микроволновой керамики с высоким показателем диэлектрической проницаемости, однако предлагаются резонаторы и плоской формы для более компактных устройств. Им удалось передавать энергию на значительные расстояния, что является несомненным плюсом, например, для аппаратов вспомогательного кровообращения, а также им удалось достичь устойчивой передачи энергии даже при смещении резонаторов друг относительно друга.

Такие беспроводные системы передачи энергии к сердечному устройству позволят расширить возможности применения их в медицинских имплантируемых устройствах, так как резонаторы из керамики менее подвержены нагреву и позволят избежать нагрева кожных покровов и органов человека.

В лаборатории беспроводных медицинских интерфейсов НИУ МИЭТ ученые предлагают разработку медицинских приборов с персонализированными индуктивными системами беспроводной передачи энергии. Предлагается устройство небольших размеров, размещенное на эластичном поясе и содержащее индуктивную катушку, а также принимающую катушку внутри организма. Персонализация заключается в подборе геометрии катушек и расстояния между ними для каждого в отдельности с учетом физиологических особенностей человека. При этом остальные составляющие устройства беспроводной передачи энергии остаются универсальными.

Для таких устройств важными являются надежность и бесперебойность, так как она влечет большие последствия при нарушении одного из контролируемых параметров [11].

Новый способ реализации чрескожной передачи энергии сердечному устройству. Наш коллектив исследователей предлагает систему чрескожной передачи энергии для сердечного устройства, содержащего резонансные катушки, электродвигатель и соединенный с ним насос для перекачки крови, согласно изобретению, образующие контур резонансные катушки выполнены в виде четырех наборных катушек, электрически связанных с емкостью и размещенных по разные стороны тела человека с возможностью резервировать друг друга при работе. При этом электродвигатель выполнен в виде аксиальной электрической машины с расположением фаз 2×3 и установлен на одном валу с насосом перекачки крови.

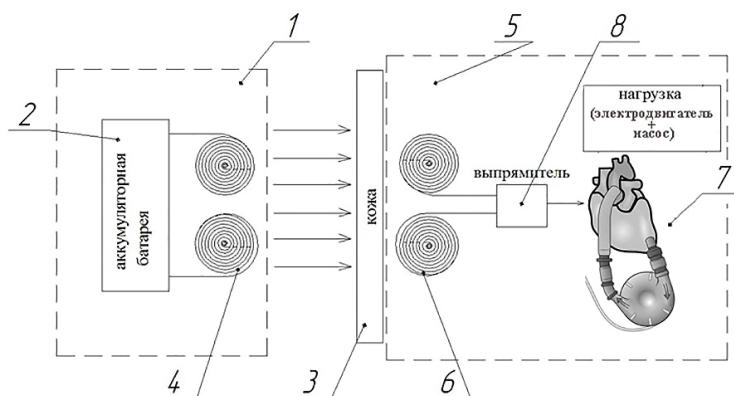


Рис. 6. Схема системы транскутанной передачи энергии к сердечному устройству

Использование двух каналов приема и передачи позволяет передавать непрерывный сигнал для бесперебойной работы сердечного устройства. Обеспечение высокоэффективной передачи энергии очень важно для работы электродвигателя, работающего приводом для имплантируемых устройств.

Устройство для беспроводной транскутанной передачи энергии сердечному насосу включает (рис. 6) первичный резонансный контур 1 и источник питания 2, находящиеся снаружи тела человека и отделяемые слоем кожи 3. Первичный резонансный контур 1 содержит две резонансные катушки 4 и электрически связан с источником питания 2 для передачи энергии вторичному резонансному контуру 5. Переменное магнитное поле генерируется в первичном резонансном контуре 1 в ответ на электрический сигнал источника питания 2.

Устройство для беспроводной транскутанной передачи энергии сердечному насосу содержит вторичный резонансный контур 5 с двумя резонансными катушками 6, в котором присутствует нагрузка в виде имплантируемого блока 7, содержащего насос для перекачки крови и приводной электродвигатель, а также выпрямитель 8. Электродвигатель представляет собой аксиальную осевую электрическую машину со схемой соединения фаз 2×3 , раскручивающий ротор центробежного сердечного насоса. Вторичный резонансный контур 5 расположен относительно первичного резонансного контура 1 на расстоянии 10–25 мм, для обеспечения эффективной передачи энергии.

Устройство для беспроводной транскутанной передачи энергии сердечному насосу работает следующим образом. На резонансную катушку 4 первичного резонансного контура 1 подается электрический сигнал от источника питания 2, после чего в первичном резонансном контуре 1 генерируется магнитное поле. В свою очередь резонансная катушка 6, находящаяся во вторичном резонансном контуре 5, генерирует электрический сигнал на имплантируемый блок 7 через выпрямитель 8, благодаря переменному магнитному полю. Сигнал от выпрямителя 8 передает энергию на имплантируемый блок 7, приводя в действие электрический двигатель, который затем приводит в работу насос для перекачки крови.

Такая система передачи энергии является более безопасной и позволит резервировать работу, что не позволит прекратить работу сердечного устройства и не приведет к нарушению деятельности организма человека.

Заключение. Таким образом, перспективы развития такого направления как беспроводная система передачи энергии аппаратам вспомогательного кровообращения имеет ряд направлений. Это повышение эффективности передачи с помощью подбора материалов, выбора оптимальных рабочих частот, выбора конструкции и формы передающих и принимающих катушек, а также возможность корректировки и подбора оптимальной мощности. Для безопасной эксплуатации сердечных устройств необходимо соблюдение ориентации катушек или использования страховочных устройств, которые бы позволили таким устройствам работать без перебоев.

А также обеспечение термобезопасности и биосовместимости, за счет увеличения стабильности и эффективности передачи энергии.

В дальнейшем коллективом планируется разработка математической модели устройства транскутанной передачи энергии, изучение свойств и поведения различных материалов, применяемых в устройстве, реализации более безопасного, биосовместимого устройства для энергоснабжения аппаратов вспомогательного кровообращения.

Библиографический список

1. Mechanical Circulatory Support as a Bridge to Transplantation. URL: <https://thoracickey.com/mechanical-circulatory-support-as-a-bridge-to-transplantation/#CR001037> (дата обращения: 12.09.2019).
2. Данилов А. А., Иткин Г. П., Селищев С. В. Развитие методов транскутанного беспроводного энергообеспечения имплантируемых систем вспомогательного кровообращения // Медицинская техника. 2010. № 4 (262). С. 6–11.
3. Передача энергии на расстояние с помощью радиосигнала. Беспроводная передача электроэнергии. Принцип действия. URL: <https://erfa.ru/peredacha-energii-na-rasstoyanie-s-pomoshchyu-radiosignala-besprovodnaya.html> (дата обращения: 12.09.2019).
4. Dissanayake T., Budgett D., Hu A. P. [et al.]. Transcutaneous Energy Transfer Method for Powering Implantable Biomedical Devices // 13th International Conference on Biomedical Engineering. IFMBE Proceedings. 2009. Vol. 23. P. 235–239. DOI: 10.1007/978-3-540-92841-6_57.
5. Schuder J. C. Powering an Artificial Heart: Birth of the Inductively Coupled-Radio Frequency System in 1960 // Artificial Organs. 2002. Vol. 26, no. 11. P. 909–915. DOI: 10.1046/j.1525-1594.2002.07130.x.
6. Искусственное сердце человека — пересадка в Ас-суте. URL: <https://msassuta.com/otdeleniya/kardiohirurgiya/>

iskusstvennoe-serdtse-cheloveka-peresadka-v-assute (дата обращения: 15.09.2019).

7. tCoil — беспроводная зарядка для сердечных насосов. URL: <https://medgadgets.ru/novosti-2/nauka-i-issledovaniya/zdorovyie/cardio/tcoil-besprovodnaya-zaryadka-dlya-serdechny.html> (дата обращения: 16.09.2019).

8. The Leviticus Cardio wireless COPLANAR ENERGY TRANSFER (CET) SYSTEM. URL: <http://leviticus-cardio.com/products.asp> (дата обращения: 15.09.2019).

9. Song M., Belov P., Kapitanova P. Wireless power transfer based on dielectric resonators with colossal permittivity // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109, Issue 22. DOI: 10.1063/1.4971185.

10. Song M., Iorsh I., Kapitanova P., Belov P., Nenasheva E. Wireless power transfer based on magnetic quadrupole coupling in dielectric resonators // Applied Physics Letters. 2016. Т. 108, no. 2. С. 023902.

11. Xu G., Yang X., Yang Q. [et al.]. Design on Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission and Monitoring System for Implanted Devices // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26, no. 4. P. 1–4. DOI: 10.1109/tasc.2016.2524591.

ИСМАГИЛОВ Флор Рашитович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электромеханика».

SPIN-код: 4349-7897

AuthorID (РИНЦ): 332890

ORCID: 0000-0002-2525-9815

AuthorID (SCOPUS): 56462457100

Адрес для переписки: ifr@ugatu.ac.ru

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика».

SPIN-код: 4825-0915

AuthorID (РИНЦ): 694504

ORCID: 0000-0001-5695-6974

AuthorID (SCOPUS): 55768854800

Адрес для переписки: s2_88@mail.ru

НУРГАЛИЕВА Рушана Азатовна, младший научный сотрудник кафедры «Электромеханика».

SPIN-код: 3287-2867

AuthorID (РИНЦ): 1005672

Адрес для переписки: Rushana39.45@mail.ru

МИНИЯРОВ Айбулат Халыфович, младший научный сотрудник кафедры «Электромеханика».

SPIN-код: 4762-6121

AuthorID (РИНЦ): 963734

AuthorID (SCOPUS): 57196035857

Адрес для переписки: miniar-a@ya.ru

Для цитирования

Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Нургадиева Р. А., Минияров А. Х. Устройства электроснабжения аппаратов вспомогательного кровообращения // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 27–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-27-31.

Статья поступила в редакцию 12.11.2019 г.

© Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, Р. А. Нургадиева, А. Х. Минияров