

Нетрадиционные источники энергии MFC и электропитания РЭА из биосреды. Инновационная разработка

Антти Эс

Перспективные и конкурентные разработки в области современной электроники связаны с расширением возможностей преобразования энергии естественной среды, динамично меняющейся по биохимическим свойствам, в электрический ток с созданием альтернативных традиционным и возобновляемым источников питания. В статье рассматривается разработка инновационных источников тока на основе биохимической реакции – биоразлагаемых «микробных топливных элементов» МТЭ (Microbial fuel cell – MFC) как новой технологии природных экологических электронных систем.

MFC – это тип биоэлектрохимической системы топливных элементов, также известный как микротопливный элемент, генерирующий электрический ток путём отвода электронов, образующихся в результате микробного окисления восстановленных соединений (также известных как топливо или донор электронов) на аноде, к окисленным соединениям на катоде через внешнюю электрическую цепь. С ростом количества устройств в системе Интернета вещей (IoT) уже невозможно игнорировать потенциал развития сопутствующих устройств РЭА, таких как датчики и элементы питания, а также нельзя не видеть проблемы, связанные с использованием традиционных источников питания для РЭА, прежде всего их громоздкость, токсичность составляющих материалов и сложности утилизации. Но возможно использовать

доступные биотехнологии и инновационные средства получения электроэнергии, её усиления и преобразования буквально из всего, в том числе из почвы и взаимодействующих в ней с помощью биохимических реакций микроорганизмов, вплоть до мельчайших бактерий. Снабжать полученной таким образом электроэнергией города и веси пока не получится – мощность биоэлементов крайне мала. Зато велики перспективы в разработке генераторов MFC для преобразования малой энергии в маломощных электронных устройствах, решениях и приложениях.

Потенциальная польза биоэлектрогенераторов

Обозримое будущее связывают с триллионами действующих повсеместно на возобновляемых источниках электроэнергии электронных

устройств, в том числе в системах IoT. Традиционные элементы питания на основе лития, тяжёлых металлов и токсинов, опасных для человека и окружающей среды, постепенно уходят в прошлое. Кроме того, проблема их утилизации стоит довольно остро. В то же время открыты альтернативы, которые смогут обеспечивать электроэнергию для автономного и практически неиссякаемого питания устройств РЭА, а также в перспективе создания децентрализованной сети автономных электронных устройств с автономным и «беспроводным» питанием для каждого из них.

Действие инновационных топливных элементов, получающих энергию непосредственно из почвы (грунта), основано на биохимической реакции разных типов – от продуктов естественной (натуральной) природной деятельности земляных червей и биоразлагаемых отходов до грибов (плесени). Пока речь идёт только о малых значениях тока и напряжения, однако такие источники тока можно усовершенствовать с помощью электронных преобразователей. Тем не менее в уже имеющихся биоразлагаемых источниках электроэнергии ток в значении нескольких миллиампер уже достаточен для питания маломощных электронных датчиков и микромодулей РЭА, в том числе снабжённых микро-мощными беспроводными передатчиками для трансляции электропитания к другим устройствам и организации канала передачи аналоговых и цифровых данных от датчика к электронному контроллеру.

Разное назначение контроллеров и в целом систем РЭА в данной области охватывает практически любые сферы их возможного применения человеком. Кроме того, абсолютно ожидаемо, что в дальнейшем мощность подобных биогенераторов электроэнергии будет расти. Пока в почве есть органический углерод и расщепляющие микроорганизмы, топливный элемент потенциально может работать вечно.

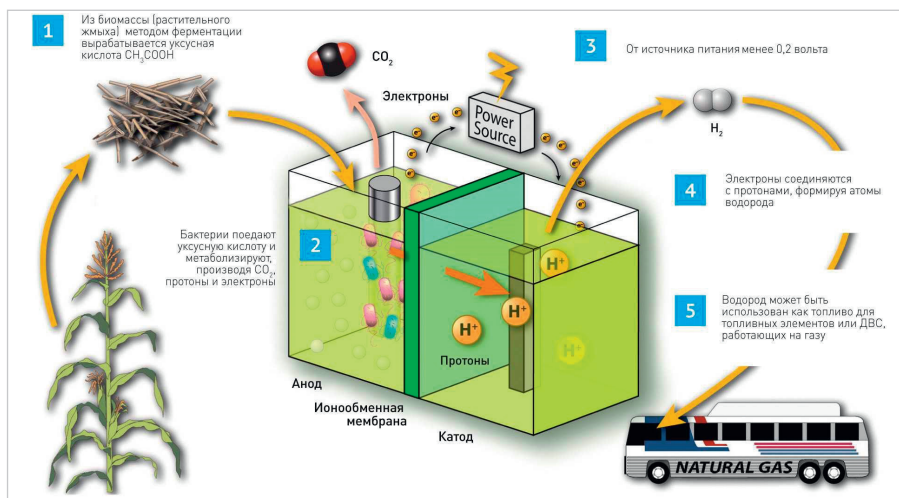


Рис. 1. Схема водородной газовой установки



Рис. 2. Автомобиль с газогенераторной установкой

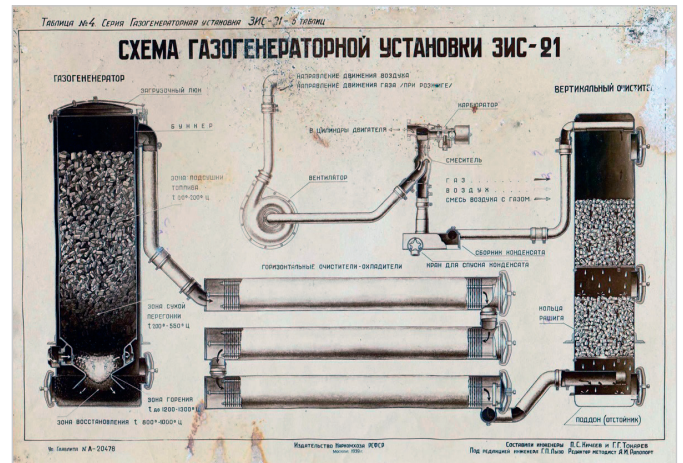


Рис. 3. Схема газогенераторной установки ЗИС-21

Из истории био- и электрогенераторов

Из практического применения в истории довольно известны двигатели на основе биоматериалов или водородные двигатели, работающие на выделяемом горючем газе. На рис. 1 представлена схема водородной газовой установки. Эта иллюстрация поможет понять перспективы биохимических реакций под воздействием электрического тока. Устройство, согласно схеме, работает так.

Из биомассы растительного происхождения (жмыха) способом ферментации вырабатывается уксусная кислота, имеющая химическую формулу CH_3COOH . Затем в специальном резервуаре «бактерии» осваивают уксусную кислоту и метаболизируют её, производя газ CO_2 . Под воздействием небольшого приложенного напряжения электроны взаимодействуют с протонами, формируя атомы водорода, который используется как горючее для топливных элементов – топливо для ДВС, работающих на газу. Однако не стоит путать данные установки с двигателями, вырабатывающими горючий газ «на дровах». По основному принципу выработки газа CO_2 работали автомобильные двигатели как прошлых лет (XX век), так и в некоторых случаях теперь, когда их применяют «любители». На рис. 2 показан автомобиль с выработкой горючего газа в котлах, где в качестве топлива использовались дрова. В условиях Крайнего Севера такие и грузовые, и легковые машины были незаменимы. Создавались подобные установки по всему миру. В Германии известна модель легковой автомашины Volkswagen Type82 (Kuberwagen и др.), в России – газогенератор конструкции профессора

Наумова устанавливали на грузовые автомобили как отечественных марок ГАЗ-М1, ГАЗ-42, ЗИС-152 (и др.), а позже и НАМИ-012 (и др. испытательные средства, не пошедшие в серию), так и на грузовые автомобили, в том числе итальянский FIAT. Такой FIAT участвовал в автопробеге по маршруту Москва–Ленинград–Москва в 1928 году. В 1931 году автопробеги с участием «дровяных колёсных транспортных средств» проходили по маршруту Ленинград–Череповец, а были в другие годы и более дальние «командировки» – от Ленинграда через Минск и Киев, Москву до Омска и обратно. Представьте себе, сколько леса надо было спалить... Сегодня воспоминания об этом можно найти в том числе в мемуарах старожилов, в частности в [1]. В целом страна жила этим видом транспорта наравне с использованием двигателей на бензине и дизельном топливе. Лишь в середине 60-х годов, а то и позже, полностью отказались от таких автомобильных анахронизмов эпохи несмотря на то, что и они имели некоторые преимущества. К примеру, в наше турбулентное время, когда типичные варианты топлива на основе нефтепереработки регулярно повышаются в цене, для кого-то самое время вспомнить о пахучих и чадающих генераторах CO_2 , реализованных на принципе сжигания дров. Для сведения заинтересованных лиц схема газогенераторной установки ЗИС-21 представлена на рис. 3.

Кстати, определение топливных элементов, производных реакции микробов и бактерий, впервые оформилось ещё в 1911 году. Прототипом служили «микробные топливные элементы», от них и состоялись аббревиатуры, используемые нашими современни-

ками в XXI веке, – МТЭ (МFC). Элементы функционируют как гальваническая батарея – с анодом, катодом и электролитом. Однако вместо того, чтобы использовать химические вещества для выработки электроэнергии, каких примеров в современной электронике в разные годы мы знаем немало, инновационные устройства MFC преобразуют электроэнергию из бактерий, которые, взаимодействуя, питаются и затем разлагаясь под влиянием даже слабого уровня кислорода, естественным образом производят движение электронов между близлежащими проводниками, помещёнными в среду. Когда электроны перетекают от анода к катоду, между электродами возникает разница потенциалов, и по известным физическим законам создаётся ЭДС, соответственно открывается возможность создавать электрическую цепь. Но для того чтобы микробные топливные элементы работали без сбоев, они должны оставаться гидратированными и насыщенными кислородом, что сложно, если просто их «закопать» под землёй или погрузить в ил водоёма, – необходимо обеспечить приток воздуха (в его составе кислород) для химической реакции разложения микроэлементов.

Хотя концепция MFC существует более века, ненадёжная работа прототипов и несовершенство технологии не позволяли совершить прорывных открытий в этой области. Кроме того, условно низкая выходная мощность устройств и биоэлектрогенераторов малых форм нивелировали усилия по их практическому использованию, особенно в условиях низкой влажности. Ранее не было широких возможностей в области материалов, не было приборов и устройств РЭА, позволяющих фиксировать даже



Рис. 4. MFC для грунтов и ила, насыщенных микроэлементами со свойствами биоразложения

незначительную силу тока и разность потенциалов в разных средах, не было возможности передавать энергию на расстоянии беспроводным способом. Все эти и некоторые другие факторы притормаживали развитие известных теперь технологий. Так, со временем изменилась концепция практичного и надёжного MFC для грунтов и ила, насыщенных микроэлементами со свойствами биоразложения (рис. 4). Испытания проводились на болоте, в чистой воде (реакция микроорганизмов в донном иле с притоком воздуха, обеспечиваемым устройством), в песчаной почве, в грунте с разными значениями влажности и с разным химическим составом, а также в компосте со сроком хранения более двух лет. Результаты экспериментов в открытом доступе не опубликованы, однако активно используются разработчиками технологии.

Технические подробности разработки

Команда исследователей Северо-западного университета (Northwestern University, г. Эванстон, шт. Иллинойс, США) в январе 2024 года презентовала результаты исследований в качестве источника питания нового элемента, основанного на преобразовании энергии – продукта естественной деятельности микроорганизмов, обитающих в почве [5–8]. Говоря упрощённо, это новый топливный элемент, собирающий энергию из микробов, живущих в грязи. К настоящему времени по состоянию на апрель 2024 года успешные испытания прошли уже три версии таких источников электропитания для маломощной РЭА (рис. 5). Новый топливный элемент представляет альтернативу традиционным батареям, содержащим вредные и опасные хими-

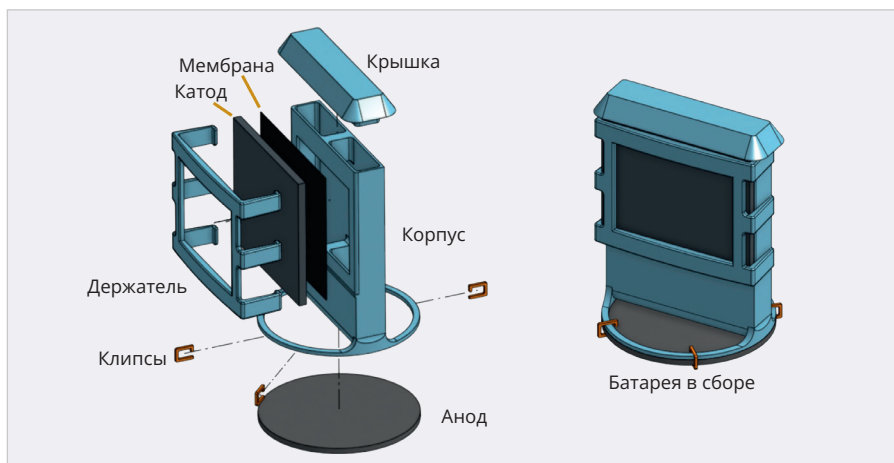


Рис. 5. Конструкция источников электропитания для маломощной РЭА

ческие вещества, загрязняющие почву, и способствующим проблеме электронных отходов. Согласно пресс-релизу исследователей, прототип биоэлектрогенератора продемонстрировал неожиданно выдающуюся эффективность как во влажных, так и в «сухих» условиях. В среднем полученный топливный элемент генерировал в 68 раз больше энергии, чем необходимо для работы электронных датчиков, диагностирующих (считывающих) его изменяемые техпроцессы (состояние). Корпус элемента достаточно прочный, чтобы выдерживать значительные изменения влажности почвы — от условно сухой (41% влажности) до погружённой в воду [6].

Помимо эмпирически доказанных возможностей питания электронных датчиков микроформата, контролирующих влажность почвы, исследователи успешно использовали новый топливный элемент как сенсор, реагирующий на прикосновения, что может оказаться перспективно незаменимой разработкой для отслеживания движения животных. Для обеспечения беспроводной связи установлена миниатюрная антенна, передающая данные на базовую станцию-микроконтроллер.

На рис. 6 представлен внешний вид конструкции, созданной в лабораторных условиях, а на рис. 7 – вид генератора MFC, извлечённого непосредственно из почвы после проведения испытаний. Чтобы протестировать новый топливный элемент, исследователи использовали его для питания датчиков, измеряющих влажность почвы и обнаруживающих прикосновение. Это может быть полезно для отслеживания животных, в том числе в аргументации, рассмотренной выше, – для пользы фермеров и в целом сотрудников АПК. Чтобы обе-

спечить беспроводную связь, исследователи оснастили электронный датчик с питанием от этого биогенератора антенной для передачи данных на контроллер в 20 метрах от датчика путём отражения радиочастотных сигналов. В результате эксперимента удалось добиться мощности топливного электрического элемента, превосходящей аналогичные, созданные по условно устаревшей технологии, на 120% [7]. Исследование, опубликованное в журналах «Proceedings of the Association for Computing Machinery on Interactive», «Mobile», «Wearable and Ubiquitous Technologies», не только представляет новейшие технологические достижения, но также связано с концепцией химической технологии, названной «числом Дамкелера». Это мера скорости протекания химических реакций по сравнению со скоростью, с которой исходный материал транспортируется к месту реакции [9].

На рис. 8 – ведущий исследователь Билл Йен в лаборатории университета Northwestern. Любопытно, что таковы результаты работы «всего лишь» недавнего выпускника университета, а исследования проводились под научным руководством доцента кафедры гражданского и экологического строительства, доктора Джорджа Уэллса. Он же обладатель патента США (2011) «Микробное производство закиси азота в сочетании с химической реакцией газообразной закиси азота».

Состав и принцип действия инновационного MFC

Свойства грунта в разных местах неодинаковы, однако именно почва является верхним слоем земной коры, состоящим из различных минералов, частиц органической материи,

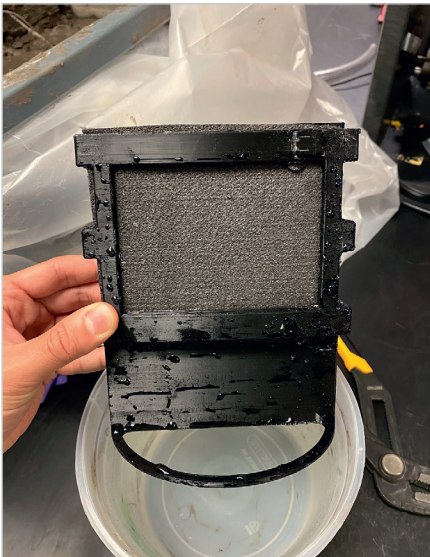


Рис. 6. Внешний вид конструкции, созданной в лабораторных условиях

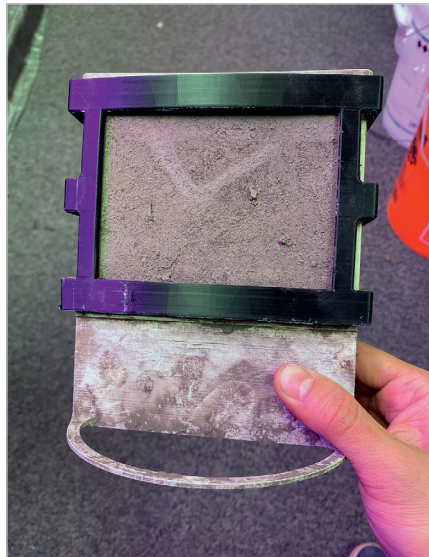


Рис. 7. Вид генератора MFC после проведения испытаний

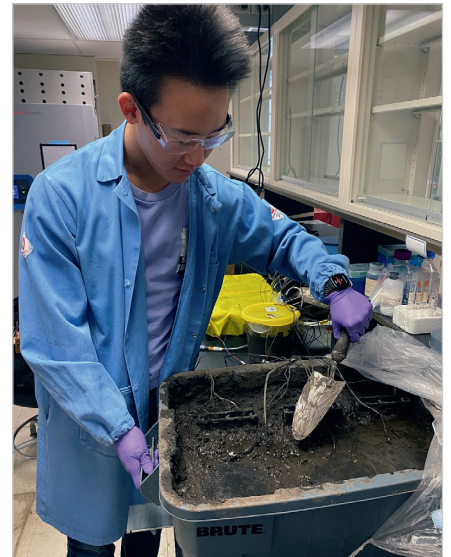


Рис. 8. Билл Йен в лаборатории университета Northwestern

Таблица 1. Некоторые зафиксированные значения тока и напряжения в разном составе грунтов

Параметры и условия среды	Выходной ток, мкА, макс	Напряжение на электродах, мкВ
Погружение на 20 см, сельхозгодия, измерение после 2 часов обильного дождя	291	400
Погружение на 20 см, в тех же условиях через 10 часов после окончания дождя	345	924
Погружение на 20 см, речной песок	15	120
Погружение на 10 см, мох на болоте	870	2700
Погружение на 15 см, компост 10-дневного отстоя	1500	14 650
Погружение на 15 см, компост (навоз) двухлетней давности	Около 1000	9200

пор, заполненных воздухом и водой. Это органический, животный и растительный субстрат, где происходят биохимические процессы, необходимые для флоры.

Один из разработанных недавно прототипов MFC показал хорошие результаты как в засушливых, так и в заболоченных условиях. Вместо использования традиционной конструкции, в которой анод и катод расположены параллельно друг другу, в топливном элементе для относительно засушливых грунтов (малой влажности) использовали перпендикулярную конструкцию расположения электродов. Конструктивный состав устройства показан на рис. 5. Анод, сделанный из углеродного волокна, расположен горизонтально по отношению к поверхности земли. Катод, изготовленный из инертного проводящего металла, расположен вертикально над анодом. Нижняя часть катода остаётся глубоко в грунте на расстоянии до 60 см под поверхностью земли, в увлажнённых слоях почвы. Это особенно актуально для грунтов и усло-

вий с относительно небольшой влажностью и климата с большой годовой солнечной активностью, естественным образом иссушающей почвы. Если говорить о болотистых местах и в целом о среде с относительно большой влажностью, глубина погружения устройства не является принципиальной, достаточно нескольких сантиметров, кроме случаев, когда нужно преобразовать электроэнергию из микроорганизмов, обитающих в донном иле.

Часть катода обработана гидроизоляционным материалом, чтобы обеспечить приток кислорода (воздуха) во время неконтролируемого или принудительного погружения устройства, к примеру, актуального в условиях большой ветреной активности (волн, если устройство используется на болоте) или наводнения – в иных условиях применения в водной среде (другой электрод – в донном иле). Такая вертикальная конструкция после возможного подтопления среды позволяет катоду высохнуть постепенно, а не сразу. Тем самым обеспечивается более долговременное пре-



Рис. 9. Элемент питания в земле

образование электроэнергии. Несмотря на то, что устройство полностью находится в земле, верхний вывод – проводящий ток контакт вертикальной конструкции находится на одном уровне с поверхностью земли. Крышка биогенератора, напечатанная на 3D-принтере, лежит на верхней части устройства и предотвращает попадание частиц пыли и осадков (рис. 9). Отверстие сверху и пустая воздушная камера, расположенная рядом с катодом, обеспечивают постоянный поток воздуха. Так в естественных условиях выглядит погружённый в грунт элемент биоэлектрогенератора. При установке в почву нескольких систем MFC, а также при погружении их на разную глубину, при разных, в том числе намеренных, увлажнениях и изменениях состава почвы, биогенераторы дают разный ток и напряжение.

В табл. 1 представлены некоторые зафиксированные значения тока и напряжения в грунтах разного состава.

Данные в таблице зафиксированы точно, но представлены в сравнительно-иллюстративной форме, поскольку в реальности зависят от многих факторов биохимического состава почв (к примеру, количество микроорганизмов наиболее велико там, где есть и более развитые организмы – черви и др.), температуры почвы и воздуха, времени года, времени суток, влажности, плотности почвы, глубины погружения и многих др. факторов. Но даже из такого неинформативного представления легко видеть, что почва может использоваться в качестве источника электроэнергии, а выходные значения тока и напряжения изменчивы в зависимости от состояния среды [2–4]. Также в исследованиях найдено подтверждение гипотезы о том, что скорость перемещения микроорганизмов в естественной среде (она зависит от их количества и скорости размножения) влияет на мощность источника тока MFC (при увеличении скорости движения микроорганизмов повышается значение тока источника); таково ещё одно открытие, описанное в [6].

Ограничения и возможности

Ограничения можно обозначить в свойствах самой среды, к примеру, эффективное и результативное функционирование рассматриваемых биоэнергетических систем возможно в зависимости от климатических особенностей местности (среды) при относительно высокой положительной температуре. Технические характеристики биоэнергетических систем также зависят от влажности, плотности и показателя pH среды (грунта), её биохимического состава, микроэлементов, насыщения калием, азотом и др. В условиях «вечной мерзлоты», климата с отрицательными температурами, к примеру, в Арктике или Гренландии такие системы малоэффективны из-за известных замедленных реакций взаимодействия микроорганизмов в условиях замораживания. То же касается относительно сухих сред, таких как пустыни, районы с динамично меняющимися формами и ландшафтами грунта на примере зыбучих песков в Мексике и других возможных районах. Загрязнённые почвы, такие как места консолидации мягких, жидких и твёрдых бытовых отходов (ТБО), химических отходов производства, засорённые

кислотами, пластиком, иными композициями и компонентами, сливом моторных масел (и др.), после которых почва восстанавливается и насыщается микроорганизмами инертно – сотни лет, разумеется, мало пригодны для рассматриваемых биоэнергетических систем. Однако и в таких сложных и загрязнённых условиях есть интересное направление для развития инженерной мысли: датчики и источники энергии на основе биоэнергетических систем могут являться маркерами состояния среды – нет микроорганизмов, значит, среда загрязнена, соответственно – «удельный вес» или условное количество микроорганизмов в среде оказывает определённое влияние на выходные характеристики биоэнергетических систем (ток и напряжение), являющихся тестером или мерой загрязнённости среды. Результат может оцениваться электронными контроллерами по выработанной шкале диагностики с использованием цифровых и аналоговых данных от таких источников тока, помещённых в конкретную среду для диагностики её состояния.

Тем не менее в типичных условиях большей части территорий суши в мире, в том числе в большинстве климатических зон в нашей стране, рассматриваемые биоэнергетические технологии вполне доступны и перспективны, в том числе в сфере очистных сооружений – контроля свойств среды с помощью автономного питания от биоразлагаемых элементов и датчиков, при диагностике и биологической очистке сточных вод.

Польза инновации для АПК

Агропромышленный комплекс – ещё одна сфера, где потенциальная польза применения биоэнергетических систем и в целом датчиков среды традиционно востребована. В XXI веке фермеры почти всех стран мира получают дотации и субсидии из бюджета, однако в разных странах технологии развиты и внедряются неодинаково. К примеру, в Германии и Финляндии (как и в др. странах) источниками возобновляемой электроэнергии ветрогенераторами и солнечными модулями обеспечено более 60% «запросов» всех потребителей, включая производственные мощности, и в том же сегменте 80% от всех частных хозяйств имеют (и уже более 20 лет) подобные установки с обеспечением соответствующей РЭА – пре-

образователями и генераторами. Эти данные подтверждаются непосредственно авторскими наблюдениями в соответствующих странах. Применяют экологичный и «адресный» дифференцированный подход в земледелии, в том числе высокоэффективные стратегии повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Технический подход основан на наличии современной РЭА для точного измерения уровней влаги, уровня питательных и загрязняющих веществ в почве для принятия решений о стратегии удобрения, в которой в основном рассчитывают на органические вещества, улучшающие здоровье сельскохозяйственных культур. Это удаётся благодаря активному использованию современной электроники для непрерывного сбора данных об окружающей среде. То же справедливо в области сохранения животного мира (флоры и фауны) и регулирования охоты, в том числе промысловой. В этой сфере электронными устройствами оборудованы (примерно с 2003 года) многие хозяйства в Европе, а также линии ограждения для безопасности людей и животных вдоль автомобильных трасс и железных дорог с отдельными участками для свободной миграции. Так оборудованы в Финляндии не только заповедники, а территории почти повсеместно; по сути, вся страна тысячи озёр, кроме агломераций и городов, – один сплошной заповедник с реализуемым принципом заботы о природе, заложенным в сознании почти каждого гражданина. Эти «линии» для безопасности животных, несмотря на огромную протяжённость, электрифицированы, снабжены не только датчиками движения и устройствами звуковой и насыщенной (яркой) световой сигнализации, срабатывающими при приближении и контакте с животными – при попытках преодолеть линии ограждения, но и электронными устройствами инфразвукового «отпугивания». Всё это стало возможным благодаря систематическим исследованиям природы и её свойств.

Но даже в хозяйствах с развитой инфраструктурой, если требуется разместить электронный датчик в условиях «дикой природы», на ферме или в заболоченной местности, придётся обеспечить электропитание – батарею или использовать энергию солнца, воды, ветра. При этом известно, что солнечные панели и модули

неэффективно работают в загрязнённой среде, когда рабочие поверхности элементов PSE покрываются со временем пылью и грязью, в условиях осадков (снега), когда нет солнца, и при этом такие конструкции обязательно снабжены накопительными АКБ и занимают условно много места. Типичные АКБ также представляют проблему, они требуют перезаряда, регламентных работ, контроля и безопасной утилизации. Фермеры имеют не по 6 соток огорода, а возделываемые площади в десятки и сотни га. Обойти большой по площади участок, чтобы заменить батареи или проконтролировать установку – преобразователь солнечной энергии, очищать солнечные панели от пыли и осадков, крайне неудобно.

Поэтому сравнительно лучшим решением в АПК является комплекс мер по производству и преобразованию электроэнергии, в том числе «сбор» электроэнергии непосредственно из того, что «под ногами», из почвы и заболоченной местности. Пока в почве и иной среде, насыщенной микроорганизмами, есть органический углерод и микроорганизмы, топливный элемент MFC потенциально может работать вечно.

Выводы и перспективы

Выводы и перспективы условно можно разделить на четыре важных направления.

Растущий спрос на микроощные датчики для электронных устройств ведёт к зависимости от экологических преимуществ и универсального применения новейших АКБ и в целом источников питания, даже маломощных. Перспективы развития рассмотренных источников питания на основе MFC связаны с их доступностью и отчасти универсальностью. Поскольку микробы, бактерии и в целом микроорганизмы окружают нас повсюду, дальнейшие разработки связаны с конкуренцией технологий и представляются важным экономическим фактором (выгодой). В статье мы лишь приоткрыли «завесу тайны» и показали направление, чтобы отечественные разработчики РЭА могли использовать и развивать результаты исследования. «Грунтовый» биоэлектронный источник питания – альтернатива батареям и АКБ, содержащим токсичные, легко воспламеняющиеся химические вещества, которые плохо утилизируются, частично проникают в землю, не раз-

лагаясь в ней, а загрязняя её, зависят от технических, материальных и логистических возможностей поставок и способствуют постоянно растущей проблеме электронных отходов. Альтернатива почти для всех сфер и процессов, происходящих на земле.

Дальнейшие перспективы исследований учёных видны в том, чтобы разработать полностью биоразлагаемый источник тока MFC, но не по аналогии биоразлагаемых (проглатываемых) источников питания, применяемых в медицинской электронной технике, а на основе компонентов грунта и содержащихся в нём минералов [6]. Кроме того, из перспективных направлений исследований известно о создании контейнеризованных автономных ячеек источников питания с высокой плотностью энергии на основе синергетических эффектов. Интересно, что с растущей потребностью в повышенной плотности энергии в современных аккумуляторных системах (для уменьшения форм-фактора) кремниевые (Si) материалы высокой ёмкости представляют потенциальную альтернативу решениям актуальных задач разработчиков РЭА из-за их превосходной теоретической ёмкости ($3579 \text{ мА}\cdot\text{ч}/\text{г}^{-1}$) и низкого рабочего напряжения, менее 100 мВ (даже в сравнении с материалами группы лития). Вторым фактором – доступность. Все компоненты для источника питания MFC можно найти буквально «под ногами», а конструктивные элементы корпуса и материалы получить на производстве или даже приобрести в торговой сети.

Третий фактор развития технологии – инновационные способы диагностики и контроля загрязнения почвы. Среди передовых технологий, играющих ключевую роль в сохранении планеты, выделяются фито- и биоремедиация, нанотехнологии, геоинженерия и создание локальных экологических систем. Автономные природные источники питания MFC и электронные датчики, взаимодействующие с ними, помогут этим процессам. В-четвёртых, с помощью технологии MFC представляется уместным тестировать эффективность добычи металлов с использованием микробов (биомайнинг). Известно, что даже камни разрушаются не только из-за погодных условий, влажности или направленного действия капель (к примеру, дождевых), но и микроорганизмами. Учёные протести-

вали это, используя бактерии для извлечения металлов меди и золота из горных пород. Это безопаснее для окружающей среды, чем воздействие на камни токсичным химическим веществом – цианидом. Поэтому добыча редкоземельных элементов и ценных металлов может быть сопряжена с дальнейшим изучением проблематики и широких возможностей применения биоэлектродгенераторов с получением энергии из среды деятельности микроорганизмов.

Электрический ток, получаемый как производная деятельности микроорганизмов в естественной и, особенно, неестественной для них среде, – одна из определяющих науку будущего концепций. В этом смысле проводится много смежных исследований, все они так или иначе связаны с современной электроникой.

Литература

1. Дионисиади А. Из турецкого огня в «сталинское полымя». URL: <https://www.mio.com.gr/en/publikatsii/eksklyuziv/ispoved-pokayanie-i-zavet-potomkam>.
2. Кашкаров А.П. Отходы – в доходы: правила и проекты безубыточного хозяйствования. М.: ДМК-Пресс, 2012. 152 с.
3. Кашкаров А.П. Современные био-, бензо- и дизель-генераторы. М.: ДМК-Пресс, 2011. 136 с.
4. Кашкаров А.П. Экологически чистые продукты на вашем участке. Практическая биодинамика. М.: Аквариум, 2012. 96 с.
5. Представлен новый топливный элемент, извлекающий энергию из живых организмов в почве. URL: <https://www.cta.ru/news/cta/178262.html>.
6. Dirt-powered fuel cell runs forever. URL: <https://news.northwestern.edu/stories/2024/01/dirt-powered-fuel-cell-runs-forever/>.
7. Flaherty N. Indium anode enables five minute battery charging. URL: <https://www.eenewseurope.com/en/this-battery-is-doing-a-beautiful-dirty-job/>.
8. Flaherty N. Indium anode enables five minute battery charging. URL: <https://www.eenewseurope.com/en/indium-anode-enables-five-minute-battery-charging/>.
9. Minjun J., Hye B.S., et al. Formulating Electron Beam-Induced Covalent Linkages for Stable and High-Energy-Density Silicon Microparticle Anode. URL: <https://www.qualenergia.it/pro/documenti/formulating-electron-beam-induced-covalent-linkages-for-stable-and-high-energy-density-silicon-microparticle-anode/>.

