

УДК 66.098.2:579.63:519.673

**К ВОПРОСУ ОБ УНИФИКАЦИИ КРИТЕРИЕВ СОПОСТАВЛЕНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ МИКРОБНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ****Кусачева С.А., Сащенко И.И., Черняев С.И., Гришаква В.В., Сафронова М.Е.***Калужский филиал «ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана», Калуга, e-mail: safronova2@mail.ru*

Настоящая статья посвящена анализу проблем и возможностей унификации разных топливных элементов в целях адекватного сравнения их технико-экономической эффективности. Рассматривается потребность в осуществлении различных методов математического моделирования процессов производства биоэлектрической энергии. Предлагается рассмотреть различные подходы к реализации моделирования, включая метод наименьших квадратов, а также применение формализма нечеткой логики. Акцентируется внимание на необходимости учета максимального количества ключевых исходных параметров, таких как объем и тип питательного субстрата, объем и тип бактериальной загрузки, температура и длительность проведения эксперимента, площадь анода и мембраны, а также электрические характеристики нагрузки. В целях обеспечения максимальной комфортности математического моделирования, с учетом вышеупомянутых ключевых параметров, а также различных особенностей и специфики вспомогательных операций, в качестве среды для программной реализации вычислительных алгоритмов, предлагается задействовать такие стационарные и сетевые информационные продукты, как табличный процессор MS Excel, облачные сервисы системы Mathematica, пакеты прикладных программ Matlab или Mathcad.

Ключевые слова: унификация, МТЭЛ, моделирование, метод наименьших квадратов, формализм нечеткой логики

**ABOUT UNIFICATION OF CRITERIA COMPARISON OF VARIOUS
MICROBIAL FUEL CELLS****Kusacheva S.A., Saschenko I.I., Chernyaev S.I., Grishakova V.V., Safronova M.E.***Kaluga Branch of «Moscow State Technical University named after N.Ye. Bauman», Kaluga,
e-mail: safronova2@mail.ru*

This research deals with the analyses the problems and of possibilities for standardization different fuel cells in ensure the adequate comparison of their technical and economic efficiency. Consider the need for implementation of the various methods of mathematical modeling of bioelectric energy production. It is proposed to consider the different approaches to the implementation of modeling, including the method of least squares, and the use of fuzzy logic formalism. Attention is focused on the need to incorporate the maximum number of key initial parameters, such as the amount and the type of nutrient substrate, the volume and type of bacterial load, temperature and duration of the experiment, the area of the anode and the membrane, and the electrical characteristics of the load. In order to ensure maximum comfort of mathematical modeling, taking into account the aforementioned key parameters, as well as the various features and specific auxiliary operations, as a medium for software implementation of computational algorithms, it is proposed to use these stationary and networked information products, such as table processor MS Excel, cloud services system Mathematica, application packages Matlab or Mathcad.

Keywords: unification, MFC, modeling, method of the smallest squares, formalism of fuzzy logic

Весьма интересным и перспективным направлением развития альтернативной энергетики в последнее десятилетие принято считать использование в качестве электрогенераторов специфических микробов. В настоящее время ряд российских и зарубежных ученых занимаются исследованиями, связанными с разработкой новых и совершенствованием, имеющихся микробных топливных элементов (МТЭЛ) и публикуют весьма познавательные статьи, представляющие в позитивном свете получаемые в ходе проводимых экспериментов, результаты [1, 5]. Генерирование и использование возобновляемой биоэнергии рассматривается как одно из возможных направлений решения задачи обеспечения процессов рационального использования материаль-

ных и энергетических ресурсов. Основные направления работ в этой области посвящены развитию альтернативных методов производства электричества, в том числе с применением особых свойств микроорганизмов. Принципиальная возможность генерации электрического тока бактериями была доказана давно, уже почти сто лет назад, а устройства для генерации тока бактериями – микробиологические топливные элементы (МТЭЛы) достаточно интенсивно изучаются около пятидесяти лет. Технология, использующая микробные топливные ячейки, которые конвертируют энергию, запасенную в химических соединениях органического состава, в электрическую энергию, в результате жизнедеятельности микроорганизмов, продолжает вызывать

у исследователей неподдельный интерес. Аналогичные исследования проводятся и в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана. На кафедре промышленной экологии и химии Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана начиная с октября 2006 года проводятся фундаментальные исследования функционирования различных систем получения биоэнергии.

Основываясь на анализе особенностей этих систем, был осуществлен подбор оптимальных конструкционных материалов, необходимых для создания оригинальной биоэлектрической установки, а также экспериментально определены параметры биотехнологического процесса и отработаны его режимы, в том числе с использованием различных субстратов органического происхождения. Например, можно утверждать, что уже имеются и вполне обнадеживающие результаты исследований по осуществлению управляемой биodeградации отходов органического происхождения с одновременным получением электрической энергии, имеющие прикладное значение. В ходе совместных с ГНЦ РФ – ИМБП РАН работ было получено биоэлектричество из жидких органических отходов с использованием электрогенных бактерий (максимальные показатели DC получены с использованием микроорганизмов *Shewanella oneidensis*: напряжение – 0,48 В; сила тока – 200 мкА) [8, 9].

Однако проведение адекватного сравнения представляемых результатов затруднено ввиду отсутствия общепризнанных показателей унификации (хотя бы минимального обязательного набора ключевых характеристик), свидетельствующих о той, или иной степени технико-экономической эффективности МТЭЛ, которые можно использовать в качестве основы для, например, разработки новой конструкции МТЭЛ. Также, имеются данные о том, что некоторым сообществам различных штаммов электрогенных микроорганизмов свойственен определенный положительный синергизм – они обладают способностью более эффективно генерировать электричество, нежели отдельные штаммы [18].

Как следствие, если все эксперименты выполнять посредством одной лабораторной установки, подбор оптимальной загрузки для конкретного вида, например, содержащих органические отходы (субстраты) стоков, может растянуться на неопределенный срок, и в таком случае для ускорения исследований возникает необходимость

приемлемой унификации, то есть требуется унифицировать алгоритм исследования.

Помимо финальных результатов эксперимента следует указывать максимальное количество исходных параметров:

- объем и тип питательного субстрата;
- объем и тип бактериальной загрузки;
- температуру проведения эксперимента;
- длительность эксперимента;
- площадь анода (если используется анод сложной формы, например, графитовая паста или графитовая ткань, то следует указывать эффективную площадь при пересчете на площадь стержней);
- площадь мембраны;
- электрические характеристики нагрузки.

Вероятно, в целях формирования оптимального перечня показателей унификации, нелишней будет также и прочая информация, свидетельствующая об особенностях конструкций лабораторных установок МТЭЛ, в том числе характеризующих применяемые способы обеспечения анаэробных условий, а также сведения о принятых мерах по проведению необходимой «адаптации» различных конструкций МТЭЛ, с целью обеспечения возможности беспрепятственного «снятия» и фиксирования вышеперечисленных параметров.

Другим немаловажным препятствием для унификации, вероятно, может быть различие периодов времени, необходимых для ферментации микроорганизмами, тех или иных видов органических отходов (субстратов).

Предположим, что в среднем срок однократной загрузки составляет около 7 суток и, следовательно, для проведения минимально необходимого числа повторных экспериментов (при безусловном устранении возможного влияния случайных факторов), для получения устойчивого среднего значения, измеряемых величин, удовлетворяющих условиям минимально приемлемой степени точности (общеизвестно, что при увеличении числа наблюдений оценка, практически любого параметра, будет стремиться к его истинному значению), что позволит выявить зависимости тех или иных, значимых характеристик МТЭЛ, потребуется не менее трех измерений, или 21 сутки работы одной лабораторной установки [7, 10, 11].

Напротив, зависимость мощности (напряжения и силы тока) МТЭЛ от конструктивных характеристик (объем загрузки, площадь мембраны, площадь анода, соотношение объема субстрата к объему бакте-

рий) посчитать относительно несложно – достаточно провести серию экспериментов, изменяя по одному параметру несколько раз, а полученные значения свести в сравнительную таблицу.

Максимальную абсолютную погрешность этих измерений можно найти как сумму абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчета [6]:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{приб}} + \Delta x_{\text{отсч}}$$

После получения необходимых данных зависимость сводится в таблице, где одна характеристика представляет собой изменяемую конструктивную, а другая – полученную мощность (напряжение и сила тока). Проведение аппроксимации методом наименьших квадратов [3] позволит выявить искомую зависимость.

При проведении серии из n экспериментов с одной меняющейся характеристикой мы получим значения электрических характеристик (ток короткого замыкания и напряжение холостого хода) зависящих от изменяемой характеристики. Как следствие, мы сможем найти полином $(n-1)$ -й степени, в точности выражающий результаты наблюдений для каждой характеристики.

Разумеется, все наблюдения сопряжены с неизбежными ошибками, и так как вполне естественно стремиться к наибольшей простоте эмпирических формул, то возникает задача об определении полинома m -ой, более низкой, чем число наблюдений без единицы, степени, выражающей данные наблюдений хотя и не точно, но с некоторой, по возможности минимальной, погрешностью. Подобная задача решается методом наименьших квадратов или Гаусса [2].

Пусть даны n значений независимого переменного x :

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

и соответственные им значения функций $f(x)$:

$$f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$$

Требуется определить полином m -ой степени $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = a_0 x^m + a_1 x^{m-1} + a_2 x^{m-2} + \dots + a_{m-1} x + a_m$$

обращающийся при $x = x_i$ в величину f_i .

Получаем, таким образом, ряд условий:

$$a_0 x_1^m + a_1 x_1^{m-1} + a_2 x_1^{m-2} + \dots + a_m = f_1$$

$$a_0 x_2^m + a_1 x_2^{m-1} + a_2 x_2^{m-2} + \dots + a_m = f_2$$

.....

$$a_0 x_n^m + a_1 x_n^{m-1} + a_2 x_n^{m-2} + \dots + a_m = f_n$$

Полученные n уравнений заключают $(m+1)$ неизвестных коэффициентов:

$$a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$$

Поскольку число n , как правило, не равно $(m+1)$, то решение этой системы без дополнительных условий невозможно.

В таком случае $\varphi(x)$ находят, например, методом наименьших квадратов: коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ должны быть выбраны таким образом, чтобы сумма квадратов разностей $\varphi(x_i) - f_i$ была наименьшей, т.е. чтобы была наименьшей сумма

$$\Sigma = \sum_{i=1}^n (a_0 x_i^m + a_1 x_i^{m-1} + a_2 x_i^{m-2} + \dots + a_m - f_i)^2$$

Для выполнения этого условия достаточно, чтобы:

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial \Sigma}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial \Sigma}{\partial a_2} = 0, \dots, \quad \frac{\partial \Sigma}{\partial a_m} = 0$$

Это и даст $(m+1)$ линейных уравнений первого порядка с $(m+1)$ неизвестными:

$$a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$$

Представленный пример математического моделирования относительно несложно реализовать посредством использования возможностей, предлагаемых пользователям в электронных таблицах MS Excel. Ведь к наиболее существенным достоинствам электронных таблиц следует отнести широкие возможности математического, статистического и графического анализа данных, эффективное моделирование проблем вида «что будет, если», прямой доступ к внешним базам данных, развитый интерфейс с другими популярными пакетами, поддержка средств мультимедиа, наличие инструментария для работы в сети Интернет. А при необходимости наличие в них встроенного языка программирования высокого уровня VBA делает электронные таблицы еще более удобным легальным средством разработки приложений для научных и технических вычислений [15].

В случае необходимости, в целях унификации моделирования биотехнологических процессов, протекающих в МТЭЛ при использовании сообществ различных штаммов электрогенных микроорганизмов, которым, как отмечалось выше, свойственен определенный положительный синергизм, можно прибегнуть к уже имеющемуся опыту моделирования синергетических объектов с помощью облачных сервисов системы Mathematica [13, 14, 17].

Подводя итог, следует обратить внимание на то, что в общепринятом понимании термин «унификация» означает приведение к единообразию, к единой форме или системе. Многообразие же подходов к созданию МТЭЛ, а также различия в использовании исходной питательной среды и формировании условий протекания биотехнологических процессов, безусловно, подталкивают к созданию математических моделей, например, с использованием формализма нечеткой логики.

Для многих систем управления сложными технологическими процессами и объектами характерны неполнота и нечеткость информации, а также недостаточная надежность и степень формализации исходных данных (следует прикладывать все возможные усилия для того, чтобы формализовать упомянутую информацию для облегчения восприятия). При работе с такими объектами в последние десятилетия часто используется формализм нечеткой логики, подразумевающий, что для объекта моделирования должны быть определены входные и выходные переменные, а также их функции принадлежности, сформирована база знаний и проведены расчеты для типовых значений входных переменных. В качестве среды для программной реализации вычислительного алгоритма могут быть задействованы пакеты прикладных программ Matlab или Mathcad [4, 12, 13, 16].

Список литературы

1. Алферов С.В., Каманина О.А., Минайчева П.Р., Доронина Н.В., Понаморев О.Н. Мощностные характеристики макета биотопливного элемента на основе метилотрофных бактерий // Известия Тульского государственного университета Естественные науки. – 2011. – Вып. 3. – С. 191–198.
2. Аппроксимация функций полиномом методом наименьших квадратов [Электронный ресурс]. // Сайт – Режим доступа: http://www.alexeypetrov.narod.ru/C/sqr_less_about.html (Дата обращения: 14.10.2015).
3. Безикович Я.С. Приближенные вычисления. – Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – С. 273–301.
4. Жукова Ю.М., Черняев С.И. Некоторые аспекты управления знаниями и интеллектуальным капиталом в ВУЗе // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 5–1. – С. 123–130.
5. Захаров Е.В., Сульгинова Т.Д., Стом Д.И. Получение электрического тока из сельскохозяйственных отходов при помощи микробных топливных элементов / Биотехнология и общество в XXI веке [Текст]: сборник статей. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. – С. 350–352.
6. Иноземцев В.А., Иноземцева С.В. Введение в электронику. – Брянск: Издательство БГПУ, 2001. – 150 с.
7. Кусачева С.А. Исследование процесса биоутилизации органических отходов с применением активного ила [Текст] / [и др.] // Научно-технические проблемы приборостроения и развития инновационной деятельности в вузе: мат-лы регион. НТК / Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М., 2014. – Т. 2. – С. 11–17.
8. Кусачева С.А., Морозенко М.И., Черняев С.И., Жукова Ю.М. Фундаментальные и прикладные аспекты производства биоэлектрической энергии // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–3. – С. 479–484.
9. Кусачева С.А., Черняев С.И., Сашенко И.И., Гришак В.В., Жукова Ю.М., Морозенко Д.Н. Обоснование выбора конструкций и материалов системы биогенерации электроэнергетики // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6–1. – С. 51–54.
10. Сафронова С.А. и др. Технология биологической утилизации отходов растительного и животного происхождения / В.К. Ильин, И.А. Смирнов, П.Э. Солдатов, И.Н. Корношенкова, Л.В. Старкова, О.В. Полтарская, А.А. Жердев, А.С. Гринин, С.А. Сафронова // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2001. – Т. 35, № 5. – С. 49–55.
11. Сафронова С.А. Эколого-гигиеническое обоснование технологии биодegradации пищевых отходов применительно к задачам жизнеобеспечения гермообъектов и других открытых антропоэкосистем [Текст]: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 14.00.32, 03.00.16 / С.А. Сафронова. – Калуга, 2002. – 20 с.
12. Семенов М.Г., Черняев С.И. Проектирование экспертных систем на базе нечеткой логики в Mathcad / Сб. избр. докл. VI Международной НПК «Современные информационные технологии и ИТ-образование»: учебно-методическое пособие. Под ред. проф. В.А. Сухомлина. – М.: ИНТУИТ.РУ, 2011. – С. 824–829.
13. Семенов М.Г., Черняев С.И. Моделирование сложных технических объектов на основе формализма нечеткой логики // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–2. – С. 291–294.
14. Семенов М., Черняев С. Облачные сервисы системы Mathematica. – Saarbrücken LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. – P. 94.
15. Семенов М.Г., Черняев С.И. Функции пользователя в Excel 2013: Разработка приложений нечеткой логики // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 3. – С. 114–117.
16. Черняев С.И., Семенов М.Г. Моделирование системы управления зарядным устройством батареи на основе нечеткой логики / Современные информационные технологии и ИТ-образование [Электронный ресурс] / Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции. / под ред. В.А. Сухомлина. – Москва: МГУ, 2011. – Т. 1. – С. 589–593.
17. Черняев С.И., Семенов М.Г., Кондратьева С.Д. Моделирование синергетических объектов с помощью облачных сервисов системы Mathematica / Сб. избр. докл. VII Международной НПК «Современные информационные технологии и ИТ-образование». Под ред. проф. В.А. Сухомлина. – М.: ИНТУИТ.РУ, 2012. – С. 818–822.
18. Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R. et al. Microbial fuel cells: methodology and technology // Environmental Science and Technology. – 2006. – № 17. Vol. 40. – P. 5181–5192.