

движений (при ходьбе). Данная особенность не наблюдается на частотном спектре перемещений испытуемого 2.

Практические результаты подтверждают, что результаты экспресс-оценки позволяют выявить наличие в параметрах походки человека характерных признаков двигательной патологии. Построение индивидуальных шаблонов походки по данным длительного мониторинга и оценка динамики двигательных показателей за длительный период времени в дальнейшем позволит не только обнаруживать двигательную патологию, но и судить о ее динамике и особенностях проявления в повседневной деятельности.

Список литературы:

1. Сковцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки. – Иваново: Издательство НППЦ-«Стимул», 1996. 344 с.
2. Логинов С.И. Возможности оценки физической активности человека с помощью датчиков движения акселерометров (литературный обзор) // ВНМТ. 2007. № 1. С. 149-151
3. Логинов С.И. Физическая активность: методы оценки и коррекции. – Сургут, 2005. 344 с.
4. Еськов В.М. Синергетика в клинической кибернетике. Ч. 1. Теоретические основы системного синтеза и исследований хаоса в биомедицинских системах. – Самара: Офорт, 2006. 233 с.
5. Grecheneva A. V., Dorofeev N. V., Kuzichkin O. R. Compensation of the accelerometer errors in solving the problem of kinematic control of dynamic objects / Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016).

6. Баймешов А.С., Куртиянская А.И. Классификация видов движения человека на основе частоты ускорения тела с использованием данных акселерометра // Альманах современной науки и образования. 2013. № 2 (69). С. 23-26.
7. Казанцева А.Г., Лавров Д.Н. Распознавание личности по походке на основе wavelet-параметризации показаний акселерометров // МСМ. 2011. № 2 (23). С. 31-37
8. Греченева А.В., Кузичкин О.Р., Константинов И.С. Алгоритмическое обеспечение системы диагностики опорно-двигательного аппарата на базе акселерометрических гониометров // Информационные системы и технологии. 2016. № 6 (98). С. 62-69.

Николай Викторович Дорофеев,
д-р техн., доцент, зав. кафедрой,
Анастасия Владимировна Греченева,
канд. техн. наук, доцент,
Владислав Сергеевич Бужинский,
магистрант,
кафедра «Управление и контроль
в технических системах»,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г. Владимир,
e-mail: grechenevaav@yandex.ru

С.В. Белов, С.В. Гудков, Ю.К. Данилейко, А.Б. Егоров,
В.И. Луканин, В.А. Сидоров, В.Б. Цветков

Устройство для биологической активации водных растворов при помощи плазмы тлеющего разряда в водяных парах

Памяти Бориса Ивановича Леонова посвящается

Аннотация

Представлен экспериментальный образец оригинального устройства для получения биологически активированных водных растворов при помощи неравновесной (электролитной) плазмы высокочастотного тлеющего разряда в водяных парах при атмосферном давлении. Описаны схема устройства и ее функциональные особенности. Приведены результаты исследовательских испытаний устройства, в том числе указаны интервалы значений основных электрохимических параметров активированного раствора. Сделан вывод о том, что активация при помощи электролитной плазмы тлеющего разряда является малозатратной и может быть реализована компактным устройством в лабораторных и полевых условиях.

Введение

В середине 70-х годов прошлого столетия было установлено, что при воздействии электрических полей наблюдается биологическая активация слабо минерализованной воды за счет происходящих в ней электрохимических процессов. В результате этих процессов вода переходит в метастабильное состояние, которое характеризуется изменением физико-химических параметров, в том числе окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), связанного с активностью различных ионов в воде, электропроводности, pH и других параметров и свойств. После прекращения внешнего электрофизического воздействия аномальные параметры и свойства воды постепенно достигают равновесных значений [1]-[3]. Протекание постоянного электрического тока через водный раствор создает избыток электронов в области катода и их удаление в области анода. Этот процесс, в свою очередь, сопровождается серией электрохимических реакций, связанной с перезарядкой ионов

на катоде и аноде, что приводит к изменению параметров воды как раствора. Получают такую воду при помощи диафрагменного проточного электрохимического реактора, включающего в свой состав специальную мембрану (диафрагму), разделяющую воду на анолит и католит. После электрохимической обработки вода в катодной области приобретает щелочную реакцию, ее ОВП снижается и может достигать отрицательных значений. Изменяются физические и электрохимические параметры, концентрация растворенных газов и свободного объема воды. В анодной области кислотность воды увеличивается, ОВП возрастает, поверхностное натяжение уменьшается, электропроводность увеличивается, возрастает количество растворенного кислорода и хлора, а концентрация водорода и азота уменьшается [4], [5]. В зависимости от количества прошедшего через электролит электрического заряда электрохимические параметры активированных растворов, полученных при помощи диафрагменного электрохимического реактора, могут принимать разные предельные значения [4]. Ано-

лит кислотный: $\text{pH} < 5$, ОВП + (800...1200) мВ; анолит нейтральный: pH порядка 7,3, ОВП + (700...100) мВ; католит щелочной: $\text{pH} > 9$, ОВП – (700...820) мВ; католит нейтральный: $\text{pH} \leq 9$, ОВП – (300...500) мВ.

В настоящее время биологически активные водные растворы различного состава и с различными параметрами широко применяются в медицине, биологии и сельском хозяйстве [6]–[8]. Главным направлением применения в медицине является их использование при хирургическом лечении больных с гнойными ранами. Обработка гнойных ран раствором анолита в первой фазе лечения воспалительного процесса обеспечивает быстрое очищение ран от гнойно-некротических фрагментов тканей, ликвидацию как аэробной, так и анаэробной инфекции. Применение католита во второй фазе лечения позволяет блокировать интоксикацию, ускорить репаративные процессы и выздоровление [9], [10]. Использование растворов анолита и католита в комплексном лечении больных с гнойно-воспалительными процессами различной локализации позволяет сократить сроки лечения в среднем до 1,5 раз, длительность антибиотикотерапии – до 50 % и снизить экономические затраты на лечение [11], [12]. Раствор анолита успешно применяется в стоматологии при лечении хронического пародонтита [13], [14]. Применение активированных водных растворов в биологии является перспективным направлением для решения целого ряда актуальных проблем, таких как стерилизация, стимулирование клеточной регенерации, деконтаминация биологических структур и др. [15]–[17]. В сельском хозяйстве активированные растворы используют для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур, их устойчивости к болезням, стимулирования роста, а также для повышения количества и качества собираемого урожая [18]–[20].

Учитывая специфику использования активированных растворов, интерес представляют растворы, сбалансированные с точки зрения биологической активности по показателям pH и ОВП, а также обогащенные наночастицами металлов и их соединений. Бактерицидная активность растворов, содержащих наночастицы в виде коллоидной нанодисперсной системы на основе серебра, кобальта, диоксида титана, оксида железа, оксида меди и других соединений, существенно возрастает. Такие биологически сбалансированные растворы (БСР) нашли применение в стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, урологии и др. [21]–[23]. Однако растворы, содержащие наночастицы в виде коллоидной нанодисперсной системы, не могут быть получены в диафрагменном электрохимическом реакторе. Для их получения должны использоваться другие способы электрохимической активации, обеспечивающие механизм активации не только за счет электролиза. К числу таких способов относится активация при помощи неравновесной низкотемпературной плазмы высокочастотного тлеющего разряда в водяных парах при атмосферном давлении.

Известным способом активации является воздействие на водные растворы потоком низкотемпературной плазмы, которая создается в аргон-содержащем газе факельным СВЧ-плазмотроном [24]. Недостатком данного способа являются значительные энергозатраты на процесс активации, а также отсутствие возможности насыщения обрабатываемого раствора активными наночастицами, образующимися за счет электрохимического растворения используемых электродов. Альтернативным способом плазменной активации является использование низкотемпературной плазмы тлеющего разряда в объеме активируемого раствора, в качестве которого обычно используется слабый раствор сильного электролита. Горение плазмы происходит на металлическом катоде за счет протекания высокочастотного тока через активируемый раствор. В данном случае электрическая цепь состоит из двух участков: плазмохимического участка с металлическим катодом и электролитным анодом и электрохимического участка с плазменным катодом и металлическим анодом. Благодаря электрохимическому растворению рабочих электродов, происходит од-

новременное обогащение активируемого раствора ионами химических элементов, которые могут менять свое зарядовое состояние (восстанавливаться) на поверхности виртуального катода, которым является граница раствор-плазма. Перезарядка положительных ионов на плазменном катоде может приводить к выпадению частиц восстановленных элементов. Восстановленные элементы, как правило, выпадают в раствор в виде наночастиц металлов или их соединений, из которых состоят рабочие электроды. Механизм возбуждения плазмы тлеющего разряда в парах воды при протекании высокочастотного тока в растворе сильного электролита низкой концентрации был рассмотрен ранее в [27]. Эффективность активированного таким способом раствора, получившего название «Плазмолит», подтверждена экспериментально на объектах растительного и животного происхождения [16]. Учитывая, что данный способ активации является multifunctional и мало-затратным, создание компактного устройства для биологической активации водных растворов представляется перспективным.

Цель работы

Работа направлена на создание макетного образца компактного устройства для плазмохимической активации водных растворов в лабораторных и полевых условиях. Задачей исследования является обоснование технических решений с точки зрения эргономической адекватности устройства, а также оценка эффективности устройства по показателям pH , ОВП, концентрации H_2O_2 и возможности обогащения производимого раствора стимулирующими микроэлементами.

Материалы и метод

В качестве объекта испытаний использовался экспериментальный образец устройства для биологической активации водных растворов при помощи низкотемпературной плазмы тлеющего разряда.

1 Описание устройства

Устройство представляет собой источник высокочастотного тока со встроенным блоком управления и рабочую часть с плазмохимическим реактором. Рабочая часть состоит из плазмохимического реактора (А) и узла вращения ротора (Б). Функциональная схема рабочей части изображена на рис. 1.

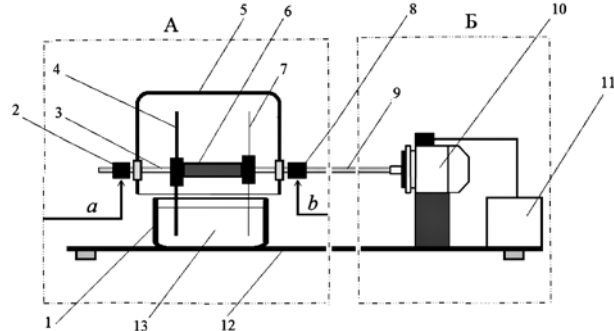


Рис. 1. Схема рабочей части устройства: А – плазмохимический реактор; Б – узел вращения ротора; 1 – емкость с активируемым раствором; 2 – щетка нейтрального электрода (НЭ); 3 – ось ротора; 4 – сменные части нейтрального электрода; 5 – крышка реактора; 6 – диэлектрическая вставка; 7 – сменные активные электроды; 8 – щетка активного электрода (АЭ); 9 – кинематическая ось; 10 – электродвигатель; 11 – регулируемый источник питания; 12 – платформа; 13 – водный раствор; а – нейтральный выход ВЧ-генератора; b – активный выход ВЧ-генератора

Установка работает следующим образом. Водный раствор сильного электролита слабой концентрации заливают в емкость 1. Затем крышка реактора 5 фиксируется таким образом, что сменные части активного 7 и нейтрального 4 электродов оказываются погруженными в водный раствор 13. От ВЧ-генератора электрический ток через токоведущие провода а и

b и щетки 2 и 8 на оси ротора 3 подается на сменные части АЭ 7 и НЭ 4 соответственно. Электрические полюса ротора разделены диэлектрической вставкой 6. Одновременно с подачей высокочастотного тока происходит включение узла вращения ротора Б. Вращение кинематической оси 9 осуществляется при помощи электродвигателя 10 и передается на ось ротора 3. Питание электродвигателя осуществляется регулируемым источником питания 11. Все элементы конструкции рабочей части размещены на платформе, выполненной из диэлектрического материала.

2 Технические характеристики

В качестве источника высокочастотного тока использовался ВЧ-генератор с рабочей частотой 440 кГц и формой выходного напряжения, близкой к синусоидальной. Максимальная выходная мощность генератора на нагрузке 100 Ом составляла 450 Вт, что обеспечивало надежный поджиг плазмы в момент соприкосновения АЭ-электрода с электролитом [28]. Сменные части электродов представляли собой отрезки металлической проволоки длиной от 4,0 до 6,0 см. Диаметр проволоки АЭ-электрода составлял 0,5 мм; диаметр проволоки НЭ был равен 1,0 мм. Материал электродов выбирался с учетом требований к параметрам активации с точки зрения насыщения раствора солями металлов и наночастицами. Частота вращения ротора могла варьироваться от 20 до 120 об./мин. Вращение системы электродов позволяет:

- облегчить поджиг плазмы в активируемом растворе, так как в момент касания активного электрода с раствором электролита напряжение генератора максимально, а площадь контакта с электролитом минимальна;
- уменьшается износ активного электрода, так как активация происходит за счет поочередного горения на каждом из четырех элементов активного электрода;
- при вращении электродов происходит необходимое перемешивание активируемого раствора.

3 Исследовательские испытания устройства для биологической активации водных растворов

С целью определения диапазона параметров БСР, получаемых при помощи данного устройства, исследовались разные варианты активированных растворов, приготовленных на основе солей NaCl и KNO₃. Контроль показателей pH, ОБП, концентрации H₂O₂ и микроэлементов в растворе проводили для разных материалов электродов и при разном времени ак-

тивации. Величина напряжения высокочастотного тока во время активации ограничивалась минимальным значением, обеспечивающим стабильный поджиг плазмы. Контроль величин pH, ОБП проводили измерителем РНТ-028, концентрацию H₂O₂ проводили рефрактометром «PAL-RI». Ток в цепи раствора I_p и среднеквадратическое напряжение на электродах $U_{ск}$ регистрировали осциллографом «LeCroy LA302», наличие микроэлементов в растворе определяли по спектру излучения спектрофотометром «LEKI SS2109UV». Основные показатели параметров активации водного раствора NaCl в концентрации 0,1 М для разных материалов электродов приведены в табл. 1. Зависимость значений pH, ОБП и H₂O₂ от времени наработки T_n для растворов NaCl и KNO₃ представлена на рис. 2-4.

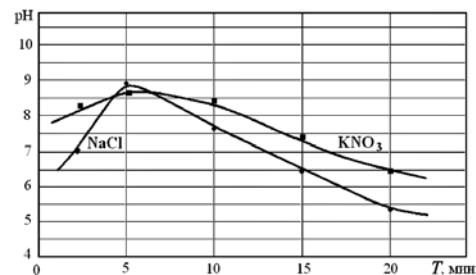


Рис. 2. Зависимость показателей pH от времени наработки для растворов NaCl и KNO₃ при использовании электродов из железа марки Армко

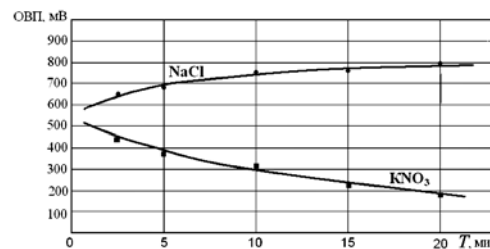


Рис. 3. Зависимость показателей ОБП от времени наработки для растворов NaCl и KNO₃ при использовании электродов из железа марки Армко

Таблица 1

Показатели активации раствора NaCl в концентрации 0,1 М

Материал электродов		pH	ОВП, мВ	H ₂ O ₂ , моль/л	I _p , А	U _{ск} , В	Время наработки T _н , мин
АЭ	Сталь IX18H10T	7,0	+ 650	0,4 · 10 ⁻³	0,95	270	3
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Вольфрам (ВА)	7,5	+ 660	0,5 · 10 ⁻³	0,80	235	
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Сталь IX18H10T	8,8	+ 690	0,5 · 10 ⁻³	0,90	260	5
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Вольфрам (ВА)	8,9	+ 710	0,6 · 10 ⁻³	0,80	235	
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Сталь IX18H10T	7,9	+ 750	0,8 · 10 ⁻³	0,80	250	10
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Вольфрам (ВА)	8,2	+ 770	0,9 · 10 ⁻³	0,70	235	
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Сталь IX18H10T	5,4	+ 790	0,8 · 10 ⁻³	0,75	255	20
НЭ	Сталь IX18H10T						
АЭ	Вольфрам (ВА)	6,2	+ 800	1,1 · 10 ⁻³	0,80	230	
НЭ	Сталь IX18H10T						

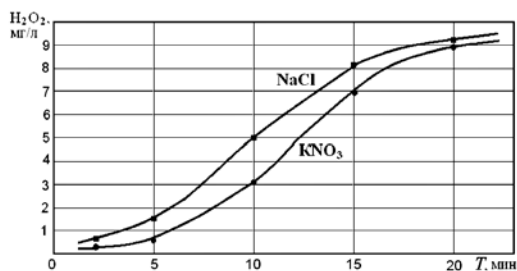


Рис. 4. Зависимость концентрации H_2O_2 от времени наработки для растворов $NaCl$ и KNO_3 при использовании электродов из железа марки Армко

Бактерицидные свойства БСР, приготовленного на основе физиологического раствора, оценивали по результату его воздействия на грамотрицательные (*P.aeruginosa*) и грамположительные (*S.aureus*) бактерии и биопленки нескольких штаммов (РА103, Sa78, Sa6538). После 2-минутной обработки бактериального субстрата активированным БСР проводили оценку колониеобразующего параметра КОЕ по стандартной схеме микробиологических исследований. В зависимости от степени разведения 1:10, 1:25 или 1:50 элиминация испытываемых бактерий как в состоянии планктонного роста, так и в составе биопленок составляла от 90 до 97 %.

Обсуждение результатов

Результаты испытаний показали, что разработанное устройство позволяет получать активированные растворы с широким спектром параметров. Это позволяет производить активированные растворы непосредственно на месте их применения, исключая необходимость транспортировки и последующего разведения.

Устройство можно эффективно использовать в медицинских учреждениях для приготовления антибактериального и стимулирующего репаративные процессы препарата, а также в сельском хозяйстве для приготовления в полевых условиях активированных растворов, используемых в качестве стимулятора роста и развития сельскохозяйственных культур. Добавление в состав электролита малых концентраций диссоциируемых солей в качестве микроэлементных добавок обогащает раствор наночастицами и способствует повышению биологической активности раствора [29]. Например, для обогащения раствора наночастицами кобальта может использоваться соль $CoSO_4$. При протекании высокочастотного тока в процессе плазменной активации будет происходить перезарядка иона Co^{2+} на электролитном катоде по схеме $CoSO_4 + 2H_2O \rightarrow H_2 \uparrow + O_2 \uparrow + Co \downarrow + H_2SO_4$ с выпадением металлических наночастиц кобальта.

Выводы

Устройство для получения биологически активированных водных растворов при помощи неравновесной плазмы высокочастотного тлеющего разряда в водяных парах при атмосферном давлении позволяет получать биологически сбалансированные растворы с широким спектром параметров. Параметры активации, оцениваемые по показателям pH, ОВП, H_2O_2 , и принципиальная возможность обогащения производимого раствора стимулирующими микроэлементами подтверждают эффективность устройства. Благодаря низкой стоимости и малому энергопотреблению данное устройство может использоваться непосредственно в медицинских учреждениях, в лабораторных и полевых условиях.

Работа выполнена ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» в рамках соглашения о научном сотрудничестве с Федеральным научным агроинженерным центром ВИМ при частичной поддержке научно-исследовательского проекта «Физические методы в медицине и биологии» (№ 0024-2019-0003).

Список литературы:

1. Леонов Б.И., Прилуцкий В.И., Бахир В.М. Физико-химические аспекты биологического действия электрохимически активированной воды. – М.: ВНИИИМТ, 1999. 244 с.
2. Леонов Б.И., Бахир В.М., Вторенко В.И. Электрохимическая активация в практической медицине / Международный симпозиум «Электрохимическая активация». Ч. 1. – М., 1999. С. 15-23.
3. Алехин С.А., Гительман Д.С. Изменение физико-химического состава и медико-биологических свойств водного раствора после его электроактивации. Механизм биологического действия / Сб. МИС-РТ. 1998. № 6. С. 18-28.
4. Бахир В.М., Задорожный Ю.Г., Леонов Б.И. и др. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов. – М.: ВНИИИМТ, 2001. 176 с.
5. Пустовалов В.А. Технология электрохимической активации водных растворов и получение стандартных электроактивированных растворов // Прикладные информационные аспекты медицины. 2006. Т. 9. № 1. С. 15-21.
6. Бахир В.М. Электрохимическая активация – 2012: новые разработки и перспективы // Водоснабжение и канализация. 2012. № 5-6. С. 65-74.
7. Тарасенко С.В., Агапов В.С., Барер Г.М. и др. Электрохимическая активация в медицине, сельском хозяйстве, промышленности / III Международный симпозиум. – М., 2001. С. 116-121.
8. Евсеев А.К., Леонов Б.И., Левина О.А., Петриков С.С., Пинчук А.В. и др. Электрохимический прибор для определения редокс-потенциала плазмы и сыворотки крови // Медицинская техника. 2016. № 1. С. 35-38.
9. Лищук В.Ф., Лобачева Г.И., Леонов Б.И., Никитин Е.С. и др. Информация – живая вода медицины (часть 1) // Биотехносфера. 2009. № 4. С. 21-34.
10. Лищук В.Ф., Лобачева Г.И., Леонов Б.И., Никитин Е.С. и др. Информация – живая вода медицины (часть 2) // Биотехносфера. 2009. № 6. С. 29-39.
11. Кошелев П.И., Резников К.М., Гридин А.А. Лечение гнойных ран с применением анолита и католита // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4. № 1. С. 54-56.
12. Кошелев П.И., Резников К.М., Гридин А.А. Применение анолита и католита для лечения гнойных ран // Прикладные информационные аспекты медицины. 2006. Т. 9. № 1. С. 69-79.
13. Крилицына Ю.Н., Кунин Д.А., Скурятин Н.В. Новые подходы в лечении заболеваний пародонта // Прикладные информационные аспекты медицины. 2006. Т. 2. № 1. С. 96.
14. Крилицына Ю.Н., Кунин Д.А., Аджиг Ю.А., Резников К.М. Использование активированных водных растворов в комплексном лечении пародонтитов // Журнал теоретической и практической медицины. 2008. Т. 6. № 1. С. 70.
15. Васильева Т.М. Плазмохимические технологии в биологии и медицине: современное состояние проблемы // Тонкие химические технологии. 2015. Т. 10. № 2. С. 5-19.
16. Ashurov M., Belov S., Gudkov S., Danyleiko Yu., Egorov A., Savranskii V., Temnov A. Effects of Low-Temperature Plasma Glow Discharge on the Proliferative Activity of Cells and the Repair Functions of Tissues in Animals and Plants // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. № 6. PP. 407-412.
17. Мухачев А.Я., Миллер Г.Г., Раковская И.В., Левина Г.А. и др. Действие низкотемпературной плазмы на различные виды микоплазм // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2013. № 2. С. 28-37.
18. Былгаева А.А., Обоева Н.А., Неустроев М.П., Тарабукина Н.П., Максимова А.Н. Перспективы использования электрохимически активированных жидких сред в сельском хозяйстве // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 4. С. 176-181.

19. Абезин В.Г., Карпунин В.В. Система капельного орошения с модулем электроактивации оросительной системы // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 6. С. 23-25.
 20. Aider M., Kastyuchik A., Gnatko E., Benali M., Plutakhin G. Electro-activated aqueous solutions: Theory and application in the food industry and biotechnology // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2012. Vol. 15. PP. 38-49.
 21. Леонтьев В.К., Кузнецов Д.В., Фролов Г.А., Погорельский И.П., Латуша Н.В. Антибактериальные эффекты наночастиц металлов // Российский стоматологический журнал. 2017. Т. 21. № 6. С. 304-307.
 22. Gunawan C., Teoh W. Y., Marquis C. P., Amal R. Cytotoxic origin of copper (II) oxide nanoparticles: Comparative studies with micron-sized particles, leachate, and metal salts // ACS Nano. 2011. № 5. PP. 7214-7225.
 23. Tamayo L. A., Zapata P. A., Rabagliati F. M. et al. Antibacterial and non-cytotoxic effect of nanocomposites based in polyethylene and copper nanoparticles // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2015. Vol. 26. № 3. P. 129.
 24. Сергеев К.Ф., Лукина Н.А., Андреев С.Н., Апашева Л.М. и др. Способ плазменной активации воды или водных растворов и устройство для его осуществления / Патент RU 2702594C1. Оpubл. 08.10.2019. Бюл. № 28.
 25. Baburin N., Belov S., Danyleiko Y., Egorov A., Lebedeva T. et al. Heterogeneous recombination in water vapor plasma // Reports of Academy of Sciences. 2009. Vol. 426. № 4. PP. 468-470.
 26. Belov S., Danileiko Yu., Nefedov S., Osiko V. et al. Specific Features of Generation of Low-Temperature Plasma in High-Frequency Plasma Electrosurgical Apparatuses // Biomedical Engineering. 2011. Vol. 45. № 2. PP. 59-63.
 27. Белов С.В., Апашева Л.М., Данилейко Ю.К., Егоров А.Б., Лобанов А.В., Луканин В.И., Овчаренко Е.Н., Савранский В.В., Шилин Л.Г. Стимуляция роста растений водным раствором, активированным плазмой тлеющего разряда // Биофизика. 2020. Т. 65. № 2. С. 1-5.
 28. Belov S., Danyleiko Yu., Egorov A., Osmanov E., Salyuk V. Plasma Glow Discharge as a Tool for the Dissection and Coagulation of Biological Tissues // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 52. № 5. PP. 305-310.
 29. Баранова Т.В., Калаев В.Н., Воронин А.А. Экологически безопасные стимуляторы роста для предпосевной обработки семян // Вестник Балтийского университета им. И. Канта. 2014. Т. 7. С. 96-102.
- Сергей Владимирович Белов,
д-р техн. наук, ведущ. научный сотрудник,
Сергей Владимирович Гудков,
д-р биол. наук, ведущ. научный сотрудник,
Юрий Константинович Данилейко,
д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией,
Алексей Борисович Егоров,
научный сотрудник,
Владимир Ильич Луканин,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
Владимир Алексеевич Сидоров,
ведущий инженер,
Владимир Борисович Цветков,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
руководитель НЦЛМТ,
ФГБУН «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН»,
г. Москва,
e-mail: ser79841825@yandex.ru

Е.В. Селютина, К.О. Гуров, Э.А. Миндубаев

Влияние рабочей частоты на выходные характеристики системы чрескожной беспроводной передачи энергии на основе усилителя мощности класса Е с емкостной подстройкой

Аннотация

Исследуется система чрескожной беспроводной передачи энергии на основе усилителя мощности класса Е, в которой для компенсации влияния смещений передающей и принимающей катушек на выходную мощность системы выполняется динамическая подстройка конденсаторов в усилителе. Система обеспечивает постоянное значение выходной мощности в диапазоне смещений катушек. Точное значение выходной мощности выбирается из диапазона возможных значений стабильной мощности. Границы данного диапазона имеют сложный характер зависимости от параметров системы. Целью рассматриваемой работы являлось исследование влияния рабочей частоты системы на ширину диапазона возможных значений стабильной мощности и общую эффективность системы чрескожной беспроводной передачи энергии. Показано, что увеличение рабочей частоты позволяет повысить эффективность системы беспроводной передачи энергии и расширить границы диапазона возможных значений стабильной мощности.

Введение

Системы чрескожной беспроводной передачи энергии (БПЭ) при помощи индуктивной связи для питания имплантируемых медицинских приборов (ИМП) устраняют необходимость в чрескожных проводах, которые увеличивают риск попадания инфекции в организм пациента [1]-[3]. В передающей части таких систем находит применение усилитель мощности (УМ) класса Е, широко используемый благодаря высокой эффективности, которая может достигать 100 % [4], [5]. В то же время эффективность усилителя значительно уменьшается при смещениях передающей и принимающей катушек системы, причиной которых являются движения пациента и изменения состояния тканей в области имплантации [6].

Существует несколько способов компенсации влияния смещений на систему БПЭ: регулировка входного напряжения, подстройка рабочей частоты, подстройка импеданса [3]. Достоинства методов компенсации влияния смещений на основе подстройки импеданса (работа на фиксированной рабочей частоте, высокая эффективность передачи энергии) делают ее предпочтительным методом при реализации систем БПЭ к ИМП [3], [7]. Ранее коллективом авторов был разработан метод компенсации влияния глубины имплантации принимающей катушки [8]. Данный метод позволяет проектировать системы БПЭ, в которых значение выходной мощности системы постоянно во всем диапазоне смещений передающей и принимающей катушек. Точное значение выходной мощности при этом выбирается из диапазона возможных значений мощнос-