

Нагрев электролита через диэлектрический барьер

А. А. Авдеев, *М. К. Болога

Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, *e-mail: mbologa@phys.asm.md

Показана возможность эффективного нагрева электролита переменным током через диэлектрический барьер. Описаны технические аспекты реализации. Показана связь с другими процессами в воде и водных электролитах. Отмечена чистота процесса нагрева по отношению к объекту нагрева.

Ключевые слова: объемный нагрев, согласование источника и нагрузки, стойкость диэлектрического барьера.

УДК 664.1.033

DOI: 10.5281/zenodo.1297943

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, составляющие содержание настоящей статьи, относятся к плазмолизу и возможным методам, связанным с пропусканием переменного тока через жидкость [1]. При плазмолизе источником электрической энергии служит силовая сеть, которую подключают к нагрузке через тиристоры. При включении тиристора через нагрузку идет короткий, но очень мощный импульс тока. Мезга, служащая нагрузкой, как и всякий водный электролит, имеет комплексное сопротивление, состоящее из емкости и сопротивления, соединенных параллельно. При открывании тиристора весь заряд, накопленный в емкости сети, переходит в емкость электролита.

Для улучшения чистоты процесса использовались диэлектрический барьер между электродом и объектом воздействия, ток повышенной частоты для уменьшения потерь мощности на барьерах, применялся источник, вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого в большой степени стабилизировала ток [2]. В результате рабочий ток перестал содержать импульсную составляющую и, как следствие, исчезли микровзрывы в электролите, которые приводят к механическому, в виде ультразвуковых (УЗ) импульсов, и химическому, в виде образования озона и окислов азота, действию на объект. Оставалось, по сути, только действие тока по нагреву электролита.

Исследования проводились на электролите и сводились к измерению электрической мощности и температуры. Температура при этом неодинакова из-за теплоотдачи по краям, что не играет существенной роли. Этот процесс, кажущийся тривиальным, нуждается в нетривиальных методах реализации.

В качестве примера в [2] рассматривался тепловой эффект, который проявляется в резком переключении источника в режим с пониженной

выходной мощностью. Переключение происходило, как в триггере, при достижении определенной температуры морской водой, которая использовалась в качестве нагрузки. Эффект имел выраженный гистерезис и четко наблюдался. Через несколько минут после включения резко менялся режим в сторону уменьшения выходной мощности источника, что способствовало снижению температуры, а после этого режим восстанавливался. Эффект зависел от согласования источника и нагрузки, комплексное сопротивление которой зависит от температуры. Чем длиннее кювета, тем меньше емкость нагрузки и больше активное сопротивление. Согласование с нагрузкой осуществлялось за счет изменения длины кюветы и не могло быть выполнено точно. При повышении температуры в нагрузке согласование нарушалось и изменялся режим работы.

Источник тока стабилизировал выходной ток. Во многих технологических процессах источник питания работает на нагрузку, являющуюся водным электролитом: защита трубопровода от коррозии, размерная импульсная обработка, гальваника, но только при плазмолизе применяется переменный ток. В импульсной обработке имеются тонкости в работе мощных источников, где любая неточность при разработке приводит к аварийным ситуациям. Почти все электролитные нагрузки не стабильны, и их сопротивление имеет комплексный характер, что делает применение данных технологий сложной технической задачей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполненных исследований был выбран резонансный источник, поскольку он имеет наивысший КПД [3]. Большая критичность качества согласования обусловлена свойствами резонансного преобразователя, с одной стороны, и непостоянством параметров электролита – с

другой. Комплексное сопротивление электролита состоит из активного сопротивления и параллельной емкости, которая имеет большую добротность (очень малые активные потери до сверхвысоких частот). Резонансный преобразователь имеет КПД порядка 70% на нагрузке типа водного электролита из-за сдвига фаз между током и напряжением. Преобразователь и емкость нагрузки представляют собой два звена с малыми потерями, включенными последовательно в одну систему. Отсюда критичность в согласовании.

Если использовать эту особенность системы, можно создать источник таким, чтобы при коротком замыкании (КЗ) ток был ограничен на уровне 25% от рабочего за счет ВАХ системы, что дает значительное преимущество в простоте, надежности и быстродействии по сравнению с традиционными системами с регулятором и отрицательной обратной связью (ООС). При этом обеспечивается выигрыш в таком важном параметре, как устойчивость. Если бы не высокая устойчивость системы, нельзя было бы засечь описанный эффект теплового триггера. Источник с ограничением КЗ возможно создать только на переменном токе. Попытки распространить ограничение тока КЗ на постоянный или импульсный низкий частоты пока не удаются.

На рис. 1 показана схема полумостового преобразователя. Два ключа на полевых транзисторах, поочередно включаясь, возбуждают резонансный контур, состоящий из конденсаторов полумоста и индуктивности рассеяния силового трансформатора. Нагрузка соединена с резонансным контуром через трансформатор. Она состоит из параллельного сопротивления и емкости электролита.

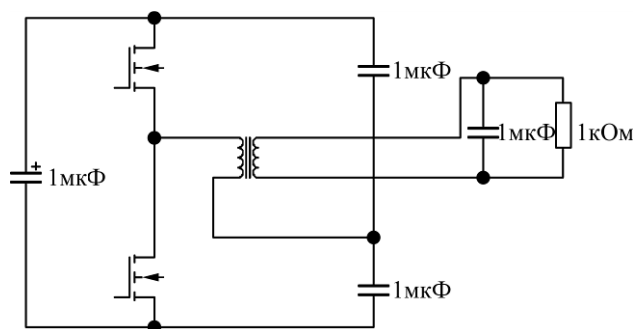


Рис. 1. Полумостовой преобразователь.

В эквивалентной схеме 1 (рис. 2) генератор переменного напряжения заменяет силовые ключи, эквивалентные элементы соответствуют физическим, то есть реальным. Она позволяет объяснить работу преобразователя с раствором электролита в качестве нагрузки, например ограничение тока КЗ.

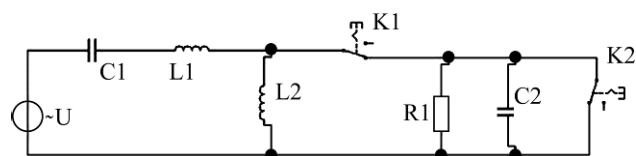


Рис. 2. Эквивалентная схема 1.

В макете использовались: резонансная емкость силового контура преобразователя, 0,47 мкФ (C1), индуктивность рассеяния со стороны первичной обмотки силового трансформатора, равная 92 мкГн (L1), индуктивность намагничивания силового трансформатора – 7,1 мГн (L2), сопротивление и емкость электролита (R1, C2).

В эквивалентной схеме два силовых ключа преобразователя заменены синусоидальным генератором напряжения. Емкость и индуктивность рассеяния силового контура имеют собственную частоту 24 кГц, без емкости нагрузки. При работе с электролитом с эквивалентной емкостью 0,47 мкФ частота системы равна 34 кГц. Когда первый ключ на эквивалентной схеме разомкнут, частота холостого хода (XX) примерно 2,7 кГц. Таким образом, имеются три режима – рабочий, XX и короткого замыкания. Для оптимальной работы системы необходимо задать рабочую частоту. Для этого замыкается второй ключ, что обеспечит режим КЗ. Меняя рабочую частоту от 13 до 40 кГц, находим ток потребления при частоте 25 кГц. Размыканием второго ключа, при замкнутом первом, выходим на рабочий режим. При изменении частоты в том же диапазоне ток потребления возрастает с локальными минимумом при 17 кГц и максимумом при 37–38 кГц. Выбирая рабочую частоту 37,5 кГц задающим генератором, получаем наибольший рабочий ток для данной нагрузки и ток КЗ примерно в 4 раза меньше рабочего. Ток XX будет мал. Тем самым достигаются характеристики, которые открывают большие перспективы во многих технологиях, связанных с электролитами. Ограничение тока КЗ при размерной обработке деталей, когда при малом зазоре вероятность КЗ большая со скоростью ограничения тока, превышающей любые системы с ООС, – это преимущество, однако имеются ограничения.

Рассмотрим эквивалентную схему 2 (рис. 3). В отличие от предыдущей схемы в режиме XX добавлен конденсатор C2. Его емкость может быть небольшой, например, равной паразитной емкости вторичной обмотки трансформатора, но в пересчете к первичной стороне частота фрагмента схемы L2, C2 может быть равна или близка к частоте силового контура. В таком режиме, частичном XX, ток потребления близок к рабочему, и это не экономично.

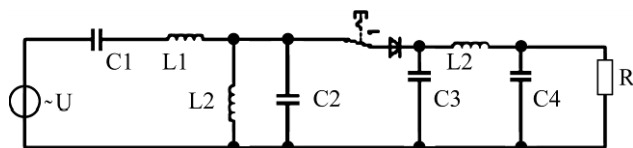


Рис. 3. Эквивалентная схема 2.

В схеме с замкнутым ключом диод – символ выпрямительного моста. Остальная схема представляет собой фильтр и нагрузку. При определенном напряжении на фильтре диод выключается, и получается уже рассмотренный режим частичного холостого хода.

Можно отметить, что любая попытка получить однополярное выходное напряжение, постоянное или импульсное, резко снижает КПД. Для выпрямителя с дросселем общий КПД составляет 11%, без него – 18%, что мало для силовой техники. Конденсатор C2 исключить нельзя по технологическим причинам, а также чтобы не исчез эффект ограничения тока КЗ.

В случае переменного тока можно включить емкость нагрузки в схему резонансного преобразователя; добротность емкости водного электролита на рассматриваемых частотах позволяет это. Оправданный интервал рабочей частоты примерно 20–200 кГц. В этом диапазоне емкость нагрузки имеет малые потери, и можно использовать ее в качестве элемента резонансного преобразователя.

При выборе мощности источника нужно обеспечить его согласование с активной составляющей комплексного сопротивления нагрузки [4]. Емкость силового контура должна быть одного порядка с емкостью электролита. При КЗ частота определяется емкостью силового контура, а в рабочем режиме она увеличивается за счет последовательной емкости нагрузки согласно эквивалентной схеме (рис. 2). Уменьшение частоты при КЗ и создает ограничение тока КЗ. Отношение частот определяет кратность ограничения рабочего тока к току КЗ.

Следует учесть, что сопротивление нагрузки должно быть примерно в 2–10 раз больше выходного сопротивления источника, чтобы он работал в области критического затухания или близко к ней, что продиктовано экономическими требованиями. В таком режиме согласование источника и нагрузки зависит от свойств электролита и от формы реактора при заданной рабочей частоте. Если сопротивление нагрузки много больше выходного сопротивления источника, то согласование теряет смысл, и ток нагрузки зависит только от частотных свойств силового контура источника.

Необходимо учесть, что комплексное сопротивление нагрузки может измениться с увеличением ее температуры. При этом могут возник-

нуть неожиданные эффекты циклического характера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

КПД нагрева электролита ограничен косинусом угла между током и напряжением на нагрузке и составляет примерно 70%. В данном случае этот параметр имеет смысл коэффициента использования сети.

Процесс нагрева электролита работает до температуры заметного газообразования (60–80°C), если кювета закрытая. Нагрев электролита – наиболее заметный результат данного процесса, но, вероятно, не единственный. При этом нагрев электролита характеризует энергетику процесса, независимо от его применения.

Для иллюстрации процесса приведены осциллограммы (рис. 4). Первые две – на эквиваленте, вторые две – на электролите. Показаны стадии настройки на синусоидальный ток в нагрузке. На реальной нагрузке (электролите) форма тока искажена, но даже при таких условиях выделяемая мощность на нагрузке увеличивается, как правило, в три раза по сравнению с дробным числом периодов тока в периоде напряжения.

На осциллограмме импульсного напряжения с переходным процессом (рис. 5) хорошо виден фазовый сдвиг (ток опережает напряжение) в случае водного электролита в качестве нагрузки.

Стойкость диэлектрического барьера

Первоначально в экспериментах применялась фторопластовая пленка на дюралевом электроде для изоляции его от электролита. С разных сторон пленки были проводники разного рода. Проводимость металла намного больше проводимости электролита. Когда возникали локальные концентрации тока на поверхности пленки, со стороны электролита эти концентрации выравнялись его малой объемной проводимостью, а со стороны металла поддерживалась большая концентрация тока из-за малости сопротивления металла.

Появление локальных максимумов неоднородностей тока можно объяснить неоднородностью поверхности металлического электрода. Это шероховатость и неравномерность окисной пленки. То, что окислы являются концентратором напряженности, замечено еще в ранних экспериментах с газовым импульсным разрядом. Таков предположительно механизм пробоя барьера.

Впоследствии использовался электролит с обеих сторон диэлектрического барьера, и наблюдалась хорошая стойкость пленки.

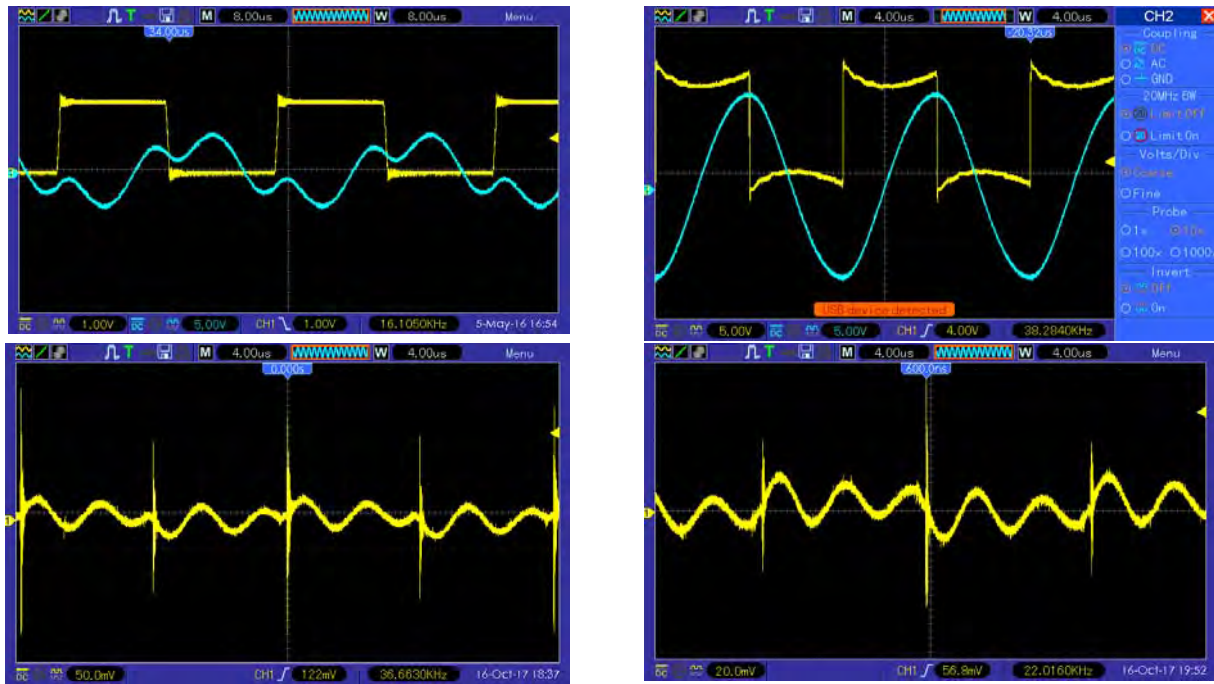


Рис. 4. Форма тока и напряжения на эквивалентной нагрузке при разной задающей частоте (верхние осциллограммы). Форма тока в электролите. Излом появляется при плохой настройке задающей.

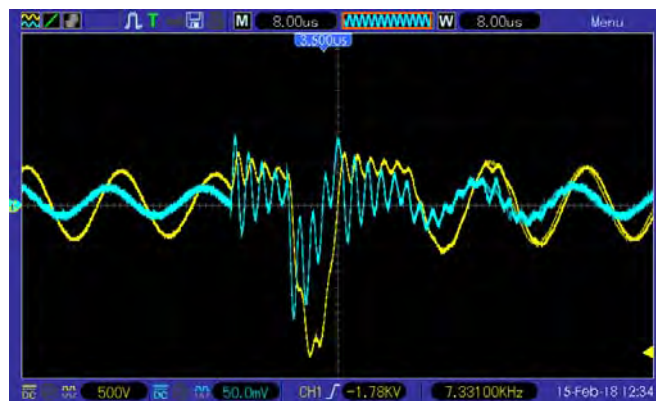


Рис. 5. Импульсный ток и напряжение на электролите.

Измерение температуры

В процессе экспериментов в зависимости от сопротивления нагрузки и мощности температура увеличивалась на единицы градусов. Измерения температуры оказались проблематичными, поскольку проводились на фоне помех в виде переменного тока и напряжения рабочей частоты. Данные полупроводниковых датчиков искажались из-за детектирования, например положительной полуволны помехи. В схеме термометра был предусмотрен такой же диод, противоположно направленный, подключенный параллельно диоду-датчику через разделительный конденсатор, и действие помехи компенсировалось.

Измерение мощности

Эксперименты проводились на переменном напряжении и токе в диапазоне частот

15–150 кГц. Использовался преобразователь среднеквадратичного значения напряжения сигнала, который был пропорционален произведению тока и напряжения на нагрузке. После нормирования входного сигнала произведение напряжения и тока, с учетом сдвига фазы, преобразовывалось в постоянное, пропорциональное действуюшему значению напряжение, которое представляло мощность и регистрировалось для оценки КПД, а также использовалось в биологических экспериментах для компенсации температурного фактора в контрольном образце.

Эксперименты с биологическими объектами

Температура электролита пропорциональна скорости движения его частиц. При пропускании переменного тока на хаотичное броуновское движение накладывается движение, пропорциональное переменному току через кювету. Проис-

ходит некоторая модуляция движения, достаточно малая. Проводились эксперименты с чайным грибом и дрожжами в водном растворе с сахаром. Разница температуры с контрольным образцом составляла от трех до десятых долей градуса после компенсации ее косвенным нагревом. Иногда получался интересный результат: дрожжи выпадали в осадок, а в контрольном образце оставались в виде взвеси, при разнице в температуре обработки 2,4°C, продолжительности обработки 60 мин и выдержке около 18 часов в одинаковых условиях.

По-видимому, существует вероятность ситуации, когда некоторые объекты, достаточно пассивные к тепловому броуновскому движению (то есть достаточно крупные), могут войти в резонанс с частотой пропускаемого тока. Эти объекты биологической или химической природы, войдя в резонанс, могут дать заметные эффекты. Напряженность поля менялась от 6 до 12 В/см при синусоидальном напряжении частотой от 25 до 115 кГц, и до 40 В/см при импульсном напряжении. Отсутствие влияния на биологический объект свидетельствует о чистоте процесса объемного нагрева и о возможности его использования для пастеризации, например виноматериалов.

Случаи выпадения взвеси в осадок были связаны с образованием газовых пробок поперек кюветы в сочетании с действием напряжения. Образование их могло быть не связано с пропуском тока, но их наличие и пропускание тока одновременно способствовали выпадению осадка до 100%, в зависимости от амплитуды напряжения и времени его воздействия. Все эксперименты проходили с небольшим превышением температуры над окружающей температурой.

Опыты с биологическими объектами носили обзорный характер и опирались на внешние признаки. Сложилось впечатление, что ток в электролите является информационным параметром, а действующим его делает переход через раздел фаз жидкость – газ. В создании такого фазового раздела играет роль температура и другие, возможно, не связанные с током факторы [4].

Интересно отметить, что за последнее десятилетие традиционные исследования идут в сторону силового воздействия на воду и ее растворы, хотя в [5, 6] отмечено, что такие воздействия имеют малое время релаксации и объект возвращается к первоначальному состоянию. Воздействие гармоническим и импульсным сигналом с незначительным тепловым воздействием на объект может влиять на живые орга-

низмы в сторону увеличения их жизнедеятельности в следующих поколениях.

ВЫВОДЫ

1. Показана техническая возможность нагрева электролита током ультразвуковой частоты с высоким КПД.

2. Оправдано применение диэлектрических барьеров, изолирующих электроды, поскольку ни высокая частота, ни полное отсутствие постоянной составляющей не гарантируют нерастворения электродов, что подтверждается изменением цвета вспомогательного электролита, в котором находились электроды (нержавеющая сталь или медь) в процессе экспериментов.

3. Нагрев электролита может быть осуществлен с высокой точностью в потоке, при малых тепловых потерях и без контакта с металлическим электродом, следовательно, является высокотехнологичным процессом.

4. Объемный нагрев через диэлектрический барьер при отсутствии газовых разрывов в жидкой фазе электролита не приводит к уничтожению биологических объектов. Более тонкие воздействия требуют дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Щеглов Ю.А., Бордиян В.В. и др. *Электроплазмолит*. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1977. 79 с.
2. Авдеев А.А., Болога М.К. *ЭОМ*. 2015, **51**(6), 108–111.
3. Ирвинг М. Готтлиб. *Источники питания, инверторы, конверторы, импульсные и линейные стабилизаторы*. М.: Постмаркет, 2000.
4. Гак Е.З. Магнитные поля и водные электролиты – в природе, научных исследованиях, технологиях. Санкт-Петербург: Элмор, 2013. 55, 59.
5. Малюшевская А.П., Малюшевский П.П. *ЭОМ*. 2016, **52**(3), 40–46.
6. Малюшевский П.П., Малюшевская А.П., Ющишина А.Н. *ЭОМ*. 2016, **52**(6), 80–90.

Поступила 02.02.18

После доработки 28.05.18

Summary

A possibility of high-efficiency heating an electrolyte by applying the alternative current through a dielectric barrier with is shown. Technical aspects of the process are described. Connections with other processes in water and aqueous solutions are shown. High purity of the heating process regarding the object of the heating is pointed out.

Keywords: space heating, source and load matching, sustainability of dielectric barrier.