

**Аристов Ю.В.¹, Коликов В.А.², Коротков С.В.¹,
Коротков Д.А.¹, Снетов В.Н.², Стогов А.Ю.²**

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ

Экономичный высокоэффективный двухканальный генератор электрических импульсов для электроимпульсной обработки воды

Представлены результаты разработки и исследования экономичного высокоэффективного двухканального генератора электрических импульсов для электроимпульсной обработки воды. Разработанный двухканальный генератор обеспечивает высокую воспроизводимость электроразрядных процессов и обеспечивает условия эффективной электроразрядной обработки воды и получения водных дисперсий оксидных и металлических наночастиц с требуемыми физико-химическими свойствами.

Ключевые слова: двухканальный генератор, электроимпульсная обработка воды.

Представлено результати розробки та дослідження економічного високоефективного двоканального генератора електричних імпульсів для електроімпульсної обробки води. Розроблений двоканальний генератор забезпечує високу відтворюваність електророзрядних процесів та забезпечує умови ефективною електророзрядної обробки води та отримання водних дисперсій оксидних та металевих наночастинок з потрібними фізико-хімічними властивостями.

Ключові слова: двоканальний генератор, електроімпульсна обробка води.

Исследования поражающего действия электрического поля и различного рода импульсных электрических разрядов (ИЭР) на находящиеся в воде микроорганизмы активно проводятся более 40 лет [1–9]. Однако остаются некоторые нерешенные вопросы в этой области. В частности, ведутся поиски методов увеличения производительности установок для электроимпульсной обработки воды с целью ее обеззараживания.

Результаты исследований последних десятилетий в области медицины указывают на то, что резкий рост онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний является следствием обеззараживания воды хлорированием [10]. Обнаружено, что в питьевой воде, обеззараженной этим способом, присутствуют устойчивые макрорадикалы, которые в течение длительного времени поддерживают протекание свободнорадикальных цепных реакций [11]. Установлено, что данные макрорадикалы являются патогенным фактором, который провоцирует возникновение и развитие тяжелых заболеваний [12, 13]. Эти обстоятельства побуждают к поиску более безопасных для человека методов обеззараживания воды.

В настоящее время ИЭР в воде могут быть использованы для обеззараживания стоков боль-

ниц и промышленных предприятий, а при наличии экспериментально подтвержденных данных об отсутствии их негативного воздействия на организм человека предполагается их использование в медицине, биологии, фармацевтической и пищевой промышленности [14–18].

Одним из сдерживающих факторов на пути внедрения данного метода в практику является ограниченная производительность установок электроимпульсной обработки воды. Использование метода мультипликации (параллельного подключения) разрядных камер к источнику питания может рассматриваться как один из способов повышения производительности данных устройств. Решению этой проблемы посвящена данная работа.

Разработанный и изготовленный базовый образец высоковольтного генератора электрических импульсов обеспечивает эффективную параллельную работу двух электроразрядных камер, предназначенных и для обеззараживания воды, и для получения водных дисперсий металлических и оксидных наноструктур с требуемыми свойствами.

Генератор разрабатывался с целью стабильного формирования в обеих разрядных камерах электрических импульсов при напряжении хо-

лостого хода 40 кВ с величиной тока 30–40 А, скоростью нарастания тока до 10^7 А/с и с частотой следования импульсов до 100 Гц. Необходимым требованием было обеспечить устойчивый пробой межэлектродных промежутков в условиях нестабильности величины пробойного напряжения и времени предпробойной стадии пробоя промежутка.

Основной проблемой при разработке такого рода генераторов является обеспечение его высокого КПД в условиях быстрого перевода энергии в разряд при большой величине отношения высокого (от единиц кОм до единиц МОм) начального сопротивления разрядного промежутка до наступления его пробоя и малого сопротивления канала разряда после пробоя (единицы Ом).

В качестве базовой схемы была выбрана силовая цепь на основе низковольтного емкостного накопителя энергии С0, повышающего импульсного трансформатора Тр и формирователя импульсов тока Ф с переключателем на основе кремниевого полупроводникового прибора тиристорного типа — реверсивно включаемого диодистора (РВД) (рис.1). В отличие от тиристорных РВД обладает высокой обратной проводимостью, не имеет электрода управления и переключается в результате кратковременного реверса блокируемого напряжения.

Малые коммутационные потери энергии в РВД позволяют передавать в первичную обмотку трансформатора короткие импульсы от емкостного накопителя. Большая амплитуда тока коммутируемых импульсов позволяет использовать импульсные трансформаторы с большим коэффициентом трансформации. В результате высокое выходное напряжение генератора, необходимое для электрического пробоя межэлектродного водяного промежутка, создается при низком напряжении на емкостном накопителе и на первичной обмотке трансформатора.

Низкое напряжение зарядки емкостного накопителя определяет малые габариты и высокую надежность элементов зарядной цепи. Малая длительность и малая амплитуда импульсов напряжения на первичной обмотке трансформатора обеспечивают малые габариты трансфор-

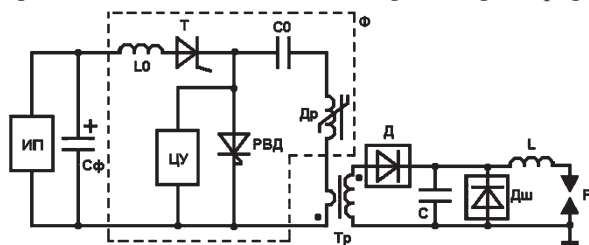


Рис. 1. Базовая схема генератора.

матора, при этом существенно упрощается его конструкция и повышается надежность.

В базовой схеме накопление энергии в емкостном накопителе С0 происходит в результате включения тиристора Т. При этом осуществляется резонансная зарядка накопителя С0 от батареи конденсаторов $C\Phi > C0$, питающейся от низковольтного источника ИП. Ток зарядки протекает через дроссель насыщения Др и одновитковую первичную обмотку трансформатора Тр. При этом обеспечивается перемагничивание их сердечников до исходного состояния.

Нагрузкой трансформатора является высоковольтный конденсатор С. При включении РВД происходит его быстрая зарядка, в результате чего зарядное напряжение прикладывается к разрядному промежутку электроразрядной камеры Р. Диодный блок Д препятствует разряду конденсатора С через вторичную обмотку трансформатора Тр в течение предпробойной стадии. После пробоя через разрядный промежуток Р происходит разряд конденсатора С. После формирования канала разряда его сопротивление резко (в 10^3 – 10^5 раз) падает, при этом индуктивность L ограничивает ток разряда конденсатора С.

После достижения максимального значения ток разряда замыкается через блок Дш. При этом напряжение на конденсаторе С близко к нулю, и вся коммутируемая энергия рассеивается в цепи L–Р.

Основным недостатком этой базовой схемы является то, что она не позволяет обеспечивать питание двух разрядных промежутков из-за разброса (несколько микросекунд) моментов их пробоя. Если пробивается один из промежутков, то напряжение на другом в этот момент уменьшается до величины падения напряжения на первом промежутке (как правило, 600–700 В), которого недостаточно для пробоя второго промежутка.

Этого недостатка лишена разработанная нами схема двухканального генератора (рис.2). В ней вторичная обмотка трансформатора Тр нагружена на две параллельные цепи, содержащие высоковольтные конденсаторы (С1, С2) и дроссели насыщения (Др1, Др2).

Дроссели Др1, Др2 в исходном состоянии имеют очень большую индуктивность и блокируют напряжение зарядки конденсаторов С1, С2. В момент зарядки конденсаторов С1, С2 до максимального напряжения происходит насыщение сердечников дросселей Др1, Др2. При этом их индуктивность резко уменьшается, и напряжение на разрядных промежутках Р1, Р2 резко нарастает.

Диодные блоки Д1, Д2 препятствуют разряду конденсаторов С1, С2 через вторичную

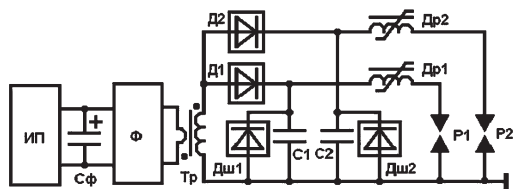


Рис.2. Схема двухканального генератора.

обмотку Тр, а диодные блоки Дш1, Дш2 исключают возможность перезарядки конденсаторов С1, С2. В результате независимо от времени задержки пробоя промежутков Р1, Р2 конденсаторы С1, С2 заряжаются до максимального напряжения, и после пробоя межэлектродного промежутка вся запасенная в них энергия выделяется в разрядных промежутках камер Р1, Р2.

По схеме, приведенной на рис.2, был изготовлен макетный образец двухканального высоковольтного генератора электрических импульсов. В данном образце генератора источник питания ИП на основе двухполупериодного диодного выпрямителя обеспечивает зарядку конденсатора фильтра Сф = 400 мкФ до 300 В от сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Формирователь Ф выполнен по схеме на рис.1. В качестве тиристора Т используется импульсный тиристор ТЧ-40-10. Дроссель насыщения Др имеет 4-витковую обмотку и сердечник из пермаллоя 50НП размером 30×15×20 мм. Емкость конденсатора С0 – 12 мкФ, С1, С2 – 1 нФ, индуктивность катушки L – 50 мкГн. Блоки Д1, Д2 состоят из 50 последовательно соединенных диодов HER308 с рабочим напряжением 1000 В и временем восстановления 75 нс. Блоки Дш1, Дш2 состоят из 60 последовательно соединенных диодов 6А10 с рабочим напряжением 1000 В. Дроссели Др1, Др2 имеют П-образный ферритовый сердечник ПК20×16 и 160 витков обмотки. Трансформатор Тр выполнен на сердечнике из пермаллоя 50НП с размером 165×55×25 мм, имеет один виток в первичной обмотке и 74 витка во вторичной. В качестве РВД использовался динистор с диаметром полупроводникового элемента 12 мм и рабочим напряжением 1200 В.

Исследование характеристик генератора проводилось на двух проточных электроразрядных камерах с медными электродами диаметром 1 мм и межэлектродным расстоянием 3–5 мм. В качестве рабочей среды использовалась дистиллированная вода.

Малое сопротивление разрядной цепи после пробоя обуславливает большую (200 мкс) длительность разрядного импульса. При этом ток спадает с постоянной времени $L_{Др1}/R$ (где $L_{Др1}$ – индуктивность дросселя Др1 после насыщения сердечника; R – суммарное сопротивление канала разряда, обмотки дросселя Др1 и диодного блока Дш1). Такая длительность раз-

рядного тока существенно превышает значение, необходимое для получения водных дисперсий с оптимальными размерами наночастиц.

С целью уменьшения длительности разрядного импульса схема генератора была дополнена звеньями рекуперации Трс1–Дс1 и Трс2–Дс2 (рис.3). Эти звенья обеспечивают уменьшение длительности импульсов разрядного тока в результате перевода части энергии в конденсатор фильтра Сф. В качестве Дс1 и Дс2 использовались диоды КД213А. Трансформаторы Трс1 и Трс2 имеют 150 витков в первичной обмотке и 50 витков во вторичной, намотанных на кольцевой ферритовый сердечник размером 45×30×100 мм.

В схеме на рис.3 разрядный ток протекает через первичную обмотку трансформаторов Трс1 и Трс2. При этом на вторичной обмотке возникает напряжение, превышающее напряжение зарядки конденсатора Сф. В результате через диоды Дс1 и Дс2 протекает ток, обеспечивающий передачу энергии из выходных цепей С1–Др1–Р1 и С2–Др2–Р2 в Сф. Вследствие высокого волнового сопротивления выходных цепей амплитуда разрядного тока при этом практически не меняется. Так как значительная часть энергии после достижения максимума то-

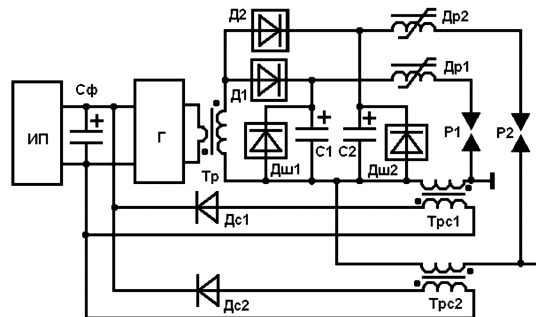


Рис.3. Схема двухканального генератора со звеньями рекуперации Трс1–Дс1 и Трс2–Дс2.

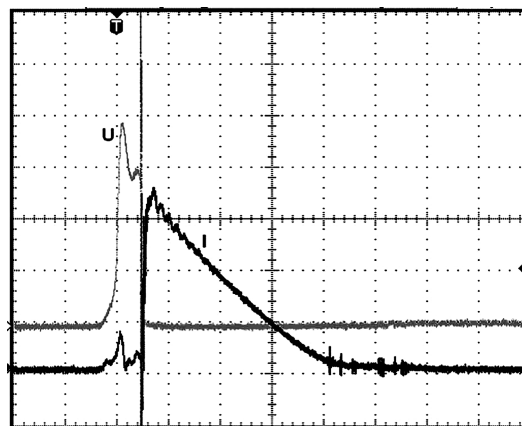


Рис.4. Характерные осциллограммы напряжения U и разрядного тока I.

ка переводится в Сф, длительность разрядного импульса существенно сокращается.

На рис.4 представлены характерные осциллограммы напряжения на разрядных промежутках камер P1 и P2 (U) и разрядного тока (I), полученные при частоте следования импульсов 100 Гц. Амплитуда напряжения на промежутке — 39 кВ, амплитуда тока — 35 А, длительность фронта тока — 5 мкс, длительность импульса тока — 40 мкс.

Выводы

Разработанный двухканальный генератор обеспечивает высокую воспроизводимость электроразрядных процессов, эффективную электроразрядную обработку воды и получение водных дисперсий, содержащих оксидные и металлические наночастицы с требуемыми свойствами.

На отработанных принципах построения электрических схем могут быть разработаны более мощные и с большим числом каналов установки для производства водных дисперсий наночастиц или для иных целей.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, проект № 11-08-00674-а.

Список литературы

- Edebo L., Selin I. The effect of pressure shock-wave and some electrical quantities in the microbicidal effect of transient electric arcs in aqueous systems // J. General Microbiol. — 1968. — Vol. 50. — P. 253–259.
- Жук Е.Г. Дезинфекция воды импульсными электрическими разрядами // Микробиология, эпидемиология и иммунология. — 1971. — Т. 48, № 1. — С. 99–103.
- Богомолова Е.В., Горячев В.Л., Коликов В.А. и др. Применение импульсных электрических разрядов для антигрибной обработки воды // Проблемы медицинской микологии. — 2003. — Т. 5, № 2. — С. 75.
- Кульский Л.А., Савлук О.С., Дейнега Е.Ю. Влияние электрического поля на процессы обеззараживания воды. — Киев : Наук. думка, 1980. — 125 с.
- Коликов В.А., Курочкин В.Е., Панина Л.К., Рутберг Ф.Г. Импульсные электрические разряды и пролонгированная микробная устойчивость воды // Докл. Акад. наук. — 2005. — Т. 403, № 4. — С. 561–563.
- Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н. Электрический метод очистки воды. Состояние проблемы и перспективы // Изв. РАН. Энергетика. — 1998. — № 1. — С. 40–55.
- Schoenbach K.H., Peterkin F.E., Kildew R.W., Beebe S.J. The Effect of Pulsed Electric Fields on Biological Cells: Experiments and Applications // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1997. — Vol. 25, № 2. — P. 284–292.
- Efremov N.M., Adamiak B.Yu., Blochin V.I. et al. Experimental Investigation of the Action of Pulsed Electrical Discharges in Liquids on Biological Objects // Ibid. — 2000. — Vol. 28, № 1. — P. 224–229.
- Rutberg Ph.G., Kolikov V.A., Kurochkin V.E. et al. Electric Discharges and the Prolonged Microbial Resistance of Water // Ibid. — 2007. — Vol. 35, № 4. — P. 1111–1118.
- Воейков В.Л., Асфарамов Р.Р., Розенталь В.М. Опасные для здоровья побочные продукты в хлорированной воде, способы их обнаружения и устранения // Материалы III Междунар. конф. «Экология и устойчивое развитие города» (Экополис-2000), Москва, РФ, нояб. 2000 г. — М. : Изд-во РАМН, 2000. — С. 226–230.
- Zoeteman B.C., Hrubec J., de Greef E., Kool H.J. Mutagenic activity associated with by-products of drinking water disinfection by chlorine, chlorine dioxide, ozone and UV irradiation // Environ Health Perspect. — 1982. — Vol. 46. — P. 197–205.
- Gottlieb M.S., Carr J.K., Morris D.T. Cancer and drinking water in Louisiana: colon and rectum // Intern. J. Epidemiology. — 1981. — Vol. 10. — P. 117–125.
- Price J.M. Coronaries, Cholesterols, Chlorine // Banhadlog Hall, Tyliwch, Landridloes : Pyramid Publications Ltd., 1984. — P. 32–33.
- Roodenburg B., Morren J., de Haan S.W.H. et al. High-voltage arc pulser for preservation of liquid food // Europ. Pulsed Power Symp., 22–24 Oct. 2002.
- Рутберг Ф.Г., Дубина М.В., Коликов В.А. и др. Влияние наночастиц оксида серебра на опухолевый рост in vivo // Докл. Акад. наук. — 2008. — Т. 421, № 2. — С. 274–276.
- Рутберг Ф.Г., Коликов В.А., Мошкин А.С. и др. Использование водных дисперсий наноструктур серебра для лечения гнойно-воспалительных заболеваний с хроническим компонентом // Патогенез. — 2008. — Т. 4. — С. 92–94.
- Богомолова Е.В., Абрамов Е.Г., Коликов В.А. и др. Использование магнитоактивных наночастиц, полученных в низкотемпературной плазме, для управления клетками микроорганизмов // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии» (БФФХ-11), Севастополь, 26–30 апр. 2011 г. — Севастополь, 2011. — С. 98–99.
- Rutberg Ph., Kolikov V., Snetov V. et al. Interaction Between Metal and Oxide Nanostructures Produced by Pulsed Electric Discharges and Biomacromolecules in Solution // Intern. Conf. Bio & Food Electrotechnol. (BFE-2009). — Compiègne, Fr., 22–23 Oct. 2009. — Compiègne, 2009.

Поступила в редакцию 20.06.12

**Aristov Yu.V.¹, Kolikov V.A.², Korotkov S.V.¹,
Korotkov D.A.¹, Snetov V.N.², Stogov A.Y.²**

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, Russia

² The Institute for Electrophysics and Electric Power of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The Economical High-Performance Dual-Channel Generator of Electrical Pulses for Pulsed Electro-Discharge Water Treatment

The results of economical high-performance dual-channel generator of electric pulses for water treatment development and research are introduced. The designed dual-channel generator provides high reproducibility of the electro-discharge processes and effective electro-discharge water treatment and also provides aqueous dispersions of oxide and metal nanoparticles with required physical and chemical properties obtaining.

Keywords: dual-channel generator, pulsed electro-discharge water treatment.

Received June 20, 2012

УДК 533.17

**Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Лернер А.С., Попов В.Е.,
Субботин Д.И., Уфимцев А.А., Штенгель С.В.**

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ

Плазменная газификация отходов как метод экономии энергии

Приведены результаты расчетного моделирования процесса плазменной газификации с использованием воздуха, водяного пара и углекислого газа в качестве плазмообразующего газа, а также экспериментальных показателей воздушно-плазменной газификации отходов древесины. Экспериментальные данные сравнены с расчетными. Показаны основные схемы организации процесса газификации отходов.

Ключевые слова: плазма, газификация древесины, синтез-газ.

Приведено результати розрахункового моделювання процесу плазмової газифікації з використанням повітря, водяної пари та вуглекислого газу як плазмоутворюючого газу, а також експериментальні показники повітряно-плазмової газифікації відходів деревини. Експериментальні дані порівняно з розрахунковими. Показано основні схеми організації процесу газифікації відходів.

Ключові слова: плазма, газифікація деревини, синтез-газ.

Ежегодно количество потребляемой энергии увеличивается в связи с ростом уровня жизни населения. В 2011 г. мировое потребление первичной энергии составило $5,2 \cdot 10^{11}$ ГДж [1], а объем произведенных отходов — $(2,8-5,3) \cdot 10^9$ т [2, 3]. Твердые бытовые отходы, содержащие до 70 % бумаги, имеют теплоту сгорания 15–20 МДж/кг, использование которой позволит сэкономить до 20 % первичной энергии.

В настоящее время наиболее эффективен процесс сжигания газообразного топлива в комбинированном парогазовом цикле. Поэтому рационально проводить газификацию твердого топлива, при которой органическая часть его превращается в синтез-газ (газовую смесь водорода и монооксида углерода), а неорганическая в шлак. Синтез-газ также может применяться для производства водорода и в процессах химического синтеза.