

03

Самосинхронизация электрогидродинамических автоколебаний при многоочаговых разрядах в электролите

© В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев, А.П. Дрожжин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
E-mail: v_s_teslenko@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 28 декабря 2006 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2007 г.

Экспериментально обнаружен эффект самосинхронизации электрогидродинамических автоколебательных процессов для многоочаговых разрядов в электролите. На примере исследований разрядов в водном растворе хлорида натрия для $N = 2, 5, 32, 56$ концентраторов тока, с диаметрами 0.2–0.5 mm и относительной дисперсией по размерам до 0.37, показана принципиальная возможность генерации синхронных электрогидродинамических автоколебательных процессов на множественных концентраторах тока. Концентраторы были выполнены в виде отверстий или металлических электродов в диэлектрической пластине. Показано, что взаимная синхронизация электрогидродинамических автоколебательных процессов на N концентраторах тока обеспечивается при включении последовательно в разрядную цепь дополнительной индуктивности. В таких системах за счет процессов самоиндукции при разрыве тока пузырьками генерируется перенапряжение в цепи, которое обеспечивает синхронность инициирования разрядов-пробоев на концентраторах и обеспечивает фазовую синхронизацию в системе.

PACS: 52.80.-s

Проблемы синхронизации и самосинхронизации многоэлементных систем различного вида являются актуальными задачами науки и техники [1]. В данной работе представлены результаты наблюдений эффекта самосинхронизации для многоочаговых разрядов в электролите.

В работах [2,3] было показано, что в электролите на одиночном концентраторе тока в виде отверстия в диэлектрической пластине, расположенной между металлическими электродами, с варьируемыми

расстояниями между ними, развиваются стабильные электрогидродинамические автоколебательные процессы. Одинаковые размеры концентраторов тока такого типа предполагают получение синхронных автоколебаний на множественных концентраторах тока [4]. Испытания таких устройств показали, что при высококачественном изготовлении одинаковых отверстий или металлических электродов в начале эксплуатации обеспечивается синхронность автоколебаний в пределах нескольких десятков импульсов тока, что соответствует синхронным пульсациям пузырьков на концентраторах. Однако в процессе эксплуатации таких устройств синхронный автоколебательный режим переходит в стохастический режим с биениями на суммарных токовых осциллограммах (рис. 1, *a*, 2, *a*, 3, *a*). Скоростная киносъемка показала, что после нескольких пульсаций пузырьки генерируются не синхронно, что и обуславливает стохастический режим пульсаций суммарного тока. В данном случае динамика пульсаций тока является косвенной характеристикой гидродинамических процессов расширения и захлопывания пузырьков на концентраторах тока [3,4]. Анализ многоочаговых разрядных систем показал, что развитие стохастичности электрогидродинамических процессов на N концентраторах тока происходит за счет неодинакового и неоднородного оплавления границ концентраторов, что соответствует увеличению дисперсии размеров концентраторов тока.

В данной работе представлены результаты методической разработки по формированию процессов синхронных автоциклических режимов на 2, 5, 32, 56 концентраторах тока в условиях начального разброса по размерам используемых концентраторов, т.е. после их длительной эксплуатации в режиме пробоев. Анализируются результаты экспериментов, выполненных для четырех постановок, с различными вариантами изготовления концентраторов тока:

- 1) для двух концентраторов тока в виде отверстий ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = 0.28$ mm) в тефлоновой пленке толщиной 20 μ m;
- 2) для пяти концентраторов тока в виде срезов из платиновых проволочек $d = 0.5$ mm, установленных заподлицо в резиновой пластине;
- 3) для 32 концентраторов тока из стальных проволочек $d = 0.4$ mm в виде срезов, выполненных заподлицо в пластине из эпоксидной смолы;
- 4) для 56 концентраторов тока из стальных проволочек $d = 0.2$ mm в виде срезов, выполненных заподлицо в пластине из эпоксидной смолы.

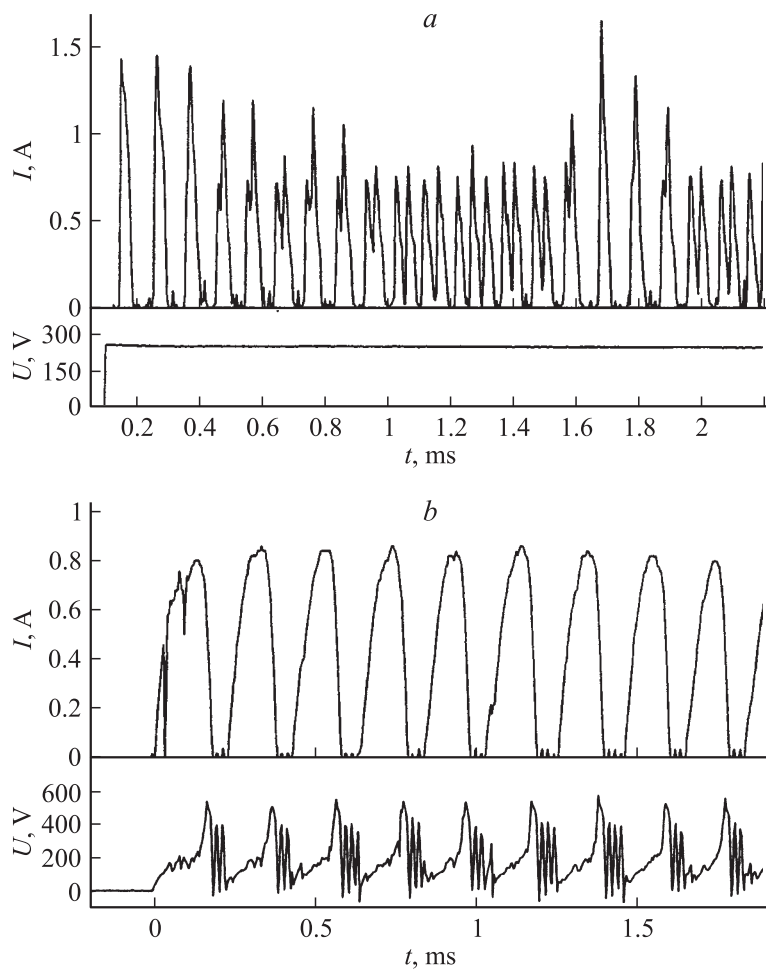


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения для концентраторов тока в виде отверстий ($d_1 = 0.26$ mm, $d_2 = 0.28$ mm) в тефлоновой пленке толщиной $20 \mu\text{m}$: *a* — без индуктивности, $U_C = 240$ V; *b* — с индуктивностью $L = 7.7$ мН, $U_C = 200$ V.

Для постановок 2–4 все металлические концентраторы были спаяны параллельно на равных расстояниях от торца концентраторов (2–5 mm).

В экспериментах использовалась та же самая установка, что и в работах [2–4]. Использовался конденсатор с емкостью $C = 100 \mu\text{F}$. Коммутация тока осуществлялась электромеханическим разрядником. Собственная индуктивность разрядной цепи установки $L_0 = 5 \mu\text{H}$.

В основе постановки экспериментов была заложена идея сравнения динамики развития электрогидродинамических процессов на концентраторах тока разного диаметра и для двух режимов:

- а) без дополнительной индуктивности в общей разрядной цепи,
- б) с одной дополнительной индуктивностью L в общей разрядной цепи ($L \gg L_0$).

На рис. 1 представлены результаты измерений тока I и напряжения U для экспериментов в постановке (1) в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 5%. Концентраторы тока в виде отверстий располагались в центре двух одинаковых кювет. Каждая диафрагма помещалась между двумя одинаковыми металлическими электродами с площадью $S > 100d^2$ на равных расстояниях ($J_1 = J_2 = 35 \text{ mm}$) от диафрагмы. Использование двух геометрически разделенных кювет связано с исключением взаимного влияния гидродинамических процессов между генерируемыми пузырьками. На осциллограммах слева (а) представлены результаты регистрации суммарного тока и напряжения в случае отсутствия в цепи разряда дополнительной индуктивности, для напряжения на конденсаторе $U_C = 240 \text{ V}$. А на осциллограммах справа (б) представлены результаты регистрации тока и напряжения в случае включения в цепь разряда индуктивности $L = 7.7 \text{ mH}$, для напряжения на конденсаторе $U_C = 200 \text{ V}$.

На рис. 2 представлены результаты измерений тока I и напряжения U для экспериментов в постановке (2). Эксперименты проводились в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 1%. Пять концентраторов тока в виде срезов платиновых проволочек $d = 0.5 \text{ mm}$ устанавливались приблизительно заподлицо в резиновой пластине на расстоянии $h = 5 \text{ mm}$ друг от друга ($h/d = 10$). В этих экспериментах учтено условие минимизации взаимного гидродинамического влияния между генерируемыми пузырьками, которое определяется условием $h/d > 6$ [5]. Противоположный отрицательный электрод ($S > 100d^2$) устанавливался на расстоянии $l = 15 \text{ mm}$. На осциллограммах слева (а)

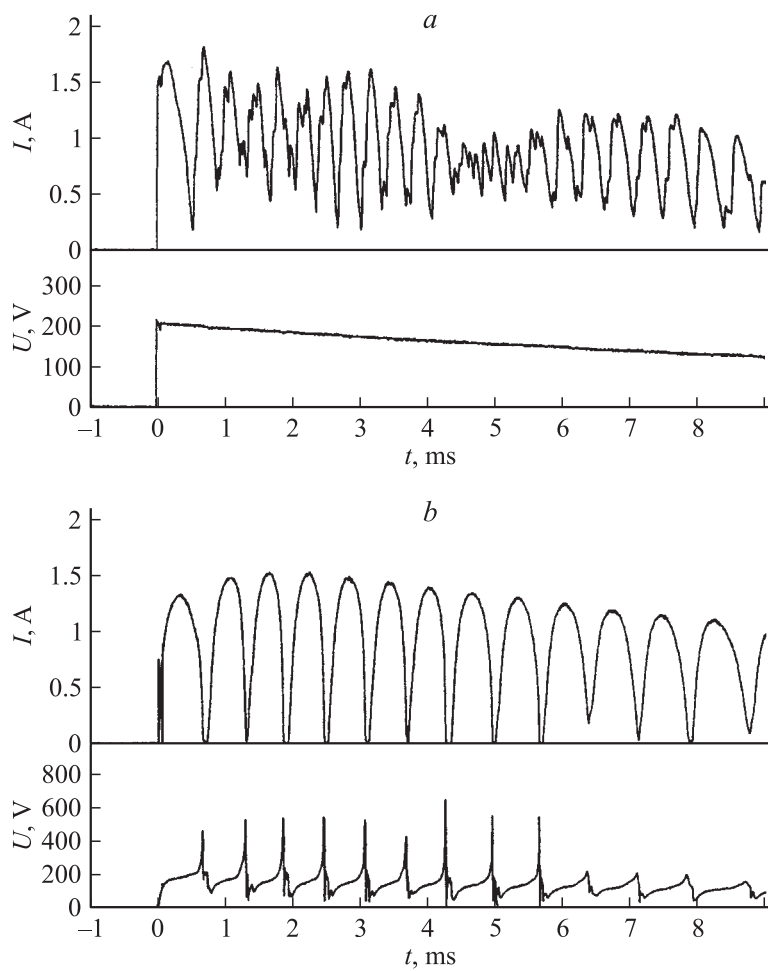


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения для пяти концентраторов тока в виде срезов из платиновых проволочек $d = 0.5$ mm, установленных заподлицо в резиновой пластине: *a* — без индуктивности, $U_C = 200$ V; *b* — с индуктивностью $L = 7.7$ mH, $U_C = 200$ V.

представлены результаты регистрации тока и напряжения в случае отсутствия в электрической цепи дополнительной индуктивности, для начального напряжения на конденсаторе $U_C = 200$ В. А на осциллограммах справа (b) представлены результаты регистрации тока и напряжения в случае включения в общую разрядную цепь индуктивности $L = 7.7$ мН. Начальное напряжение на конденсаторе $U_C = 200$ В.

Для постановок (1) и (2) осуществлялись одновременная регистрация тока и киносъемка гидродинамических процессов в области электрического пробоя в режимах (a) и (b). Из результатов киносъемки и осциллограмм тока следует, что при включении в разрядную цепь одной дополнительной индуктивности наблюдается выравнивание фаз пульсаций всех пузырьков в корреляции с импульсами суммарного тока.

На рис. 3 представлены результаты измерений тока I и напряжения U для экспериментов в постановке (3). Эксперименты проводились в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 1%. Тридцать два концентратора тока в виде срезов из стальных проволочек $d = 0.4$ мм располагались заподлицо в пластине из эпоксидной смолы на расстоянии $h = 1.1$ мм друг от друга ($h/d = 2.7$). Противоположный отрицательный электрод ($S > 100d^2$) находился на расстоянии $l = 15$ мм. На осциллограммах слева (a) представлены результаты регистрации тока и напряжения в случае отсутствия в цепи разряда дополнительной индуктивности. Начальное напряжение на конденсаторе $U_C = 400$ В. А на осциллограммах справа (b) представлены результаты регистрации тока и напряжения в случае включения в цепь разряда одной дополнительной индуктивности $L = 0.8$ мН при начальном напряжении на конденсаторе $U_C = 400$ В.

Эксперименты показали, что фазовая синхронизация обеспечивается использованием дополнительной индуктивности для широкого диапазона значений дисперсии размеров исходных концентраторов тока. Например, для постановки (2) с 5 концентраторами тока относительная дисперсия составляла: $\sigma(R)/\langle R \rangle = 0.37$, где R_i — сопротивление i -го концентратора тока, $\sigma^2(R) = [1/(n-1)]\sum_i (R_i/\langle R \rangle)^2$. Этим параметрам соответствуют осциллограммы на рис. 2.

Из представленных осциллограмм наглядно следует, что для различных видов концентраторов тока и варьируемого их числа наблюдается общая закономерность изменения динамики суммарного тока с включением в электрическую цепь индуктивности L . С подключением одной дополнительной индуктивности в разрядную цепь стохастический

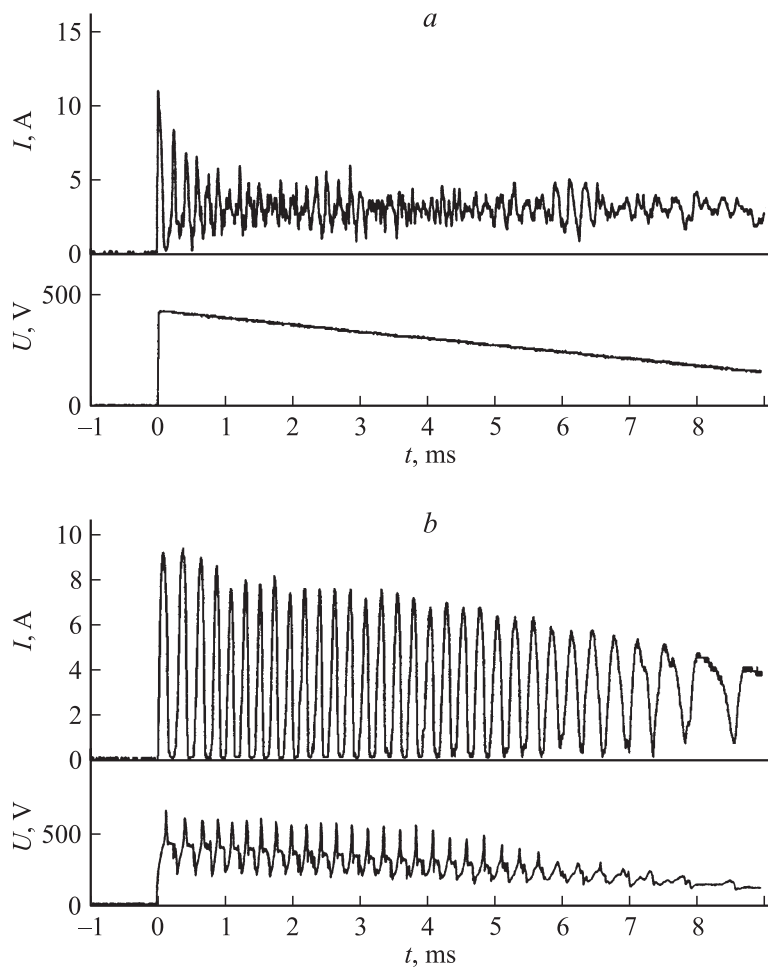


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения для 32 концентраторов тока в виде срезов из стальных проволочек $d = 0.4$ mm, установленных заподлицо в резиновой пластине: *a* — без индуктивности, $U_C = 400$ V; *b* — с индуктивностью, $U_C = 400$ V.

режим колебаний суммарного тока переходит в синхронный. Смена режимов колебаний тока можно объяснить с помощью представленных осциллограмм напряжения. Из данных экспериментальных результатов следует, что в периоды спада и роста тока в цепи генерируются импульсы избыточного напряжения U_L , которые могут превышать напряжение U_C на конденсаторе в каждом периоде пульсации пузырьков и тока. Величина избыточного напряжения определяется как

$$U_L = -L \sum_i dI_i / dt. \quad (1)$$

Индуктивность L мы задаем, а величина dI_i/dt определяется скоростью размыкания и замыкания электрической цепи на i -м концентраторе, т.е. скоростью границы пузырька в периоды его расширения и захлопывания, в моменты пересечения его границей периметра концентратора тока. Именно это избыточное напряжение U_L обеспечивает синхронизацию инициирования кольцевых разрядов-пробоев между расширяющимися и захлопывающимися пузырьками. Для подтверждения этого факта осуществлялась регистрация света из области пробоев с помощью ФЭУ-35. Эксперименты показали корреляцию во времени и по амплитудам импульсов избыточного напряжения и импульсов света.

Учитывая, что период пульсаций пузырьков пропорционален диаметру концентратора, можно предполагать, что в начальной стадии развивается каскадный процесс инициирования пробоев, начиная с концентратора тока наименьшего размера. С увеличением числа концентраторов частотный режим электрогидродинамических автоколебательных циклов начинают определять концентраторы тока, имеющие среднестатистические размеры. С увеличением индуктивности и числа концентраторов увеличивается избыточное напряжение U_L , что приводит к синхронному инициированию пробоев на всех концентраторах.

Увеличение числа концентраторов тока приводит к снижению величины индуктивности, необходимой для развития самосинхронизации, что согласуется с формулой (1). Следовательно, для каждого цикла существует пороговое значение иницирующего напряжения (U_P), которое определяется как $U_P(t) = U_C(t) + U_L(t)$. Для данных экспериментов средние пороговые значения развития самосинхронизации U_P составляли $\sim 2U_C$. Особо следует отметить, что существенное превышение U_L (в десятки раз) над пороговыми значениями U_C слабо влияло на динамику развития самосинхронизации.

Не привлекая анализа по фазовым диаграммам, в первом приближении для таких систем качество фазовой синхронизации можно оценивать с помощью следующего параметра:

$$K_S = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (2)$$

где I_{\max} , I_{\min} — максимальное и минимальное значения тока в одном цикле, определяемые по осциллограммам тока.

Если в цикле падение тока до нуля не осуществляется, то это означает, что произошел сбой фаз на n концентраторах тока и синхронизация обеспечивается только на $N-n$ концентраторах. Значение $K_S = 1$ соответствует наилучшей синхронизации. Например, для осциллограмм на рис. 2, b и 3, b удовлетворительная синхронизация наблюдается до 3–5 ms. После 5–6 ms наблюдается явно выраженное ухудшение синхронизации. Это означает, что за счет падения базового напряжения на конденсаторе (U_C) избыточного напряжения (U_L) стало недостаточно для обеспечения синхронизации на всех концентраторах тока.

Выводы:

1. Экспериментально обнаружен эффект самосинхронизации электрогидродинамических автоколебательных процессов для многоочаговых разрядов в электролите.

2. Показана принципиальная возможность генерации стабильных электрогидродинамических автоколебательных процессов на множественных концентраторах тока, с дисперсией по размерам, с помощью включения в разрядную цепь индуктивности.

3. Показано, что взаимная синхронизация электрогидродинамических автоколебательных процессов обеспечивается путем генерации импульсов избыточного напряжения в цепи разряда по законам самоиндукции за счет разрыва тока пузырьками.

Авторы благодарят К.А. Ломановича за помощь в подготовке экспериментов и С.А. Ждана за полезные обсуждения результатов работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-18145, 06-02-17453).

Список литературы

- [1] *Пиковский А., Розенблюм М., Куртис Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Изд-во „Техносфера“, 2003. 496 с.
- [2] *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Карташов А.М.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 20. С. 83–88.
- [3] *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 4. С. 24–31. <http://www.ioffe.ru/journals/pjtf/2006/04/p24-31.pdf>
- [4] *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н.* Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. Ин-т гидродинамики СО РАН. 2005. В. 123. С. 66–70. <http://swsl.newmail.ru/publ/e-a-effect.pdf>
- [5] *Тесленко В.С.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1976. № 4. С. 109–117.