

## Вейвлет-анализ свечения плазмы при эффекте мигающего света

*И.Л. Музюкин<sup>\*</sup>, П.С. Михайлов, И.В. Уйманов*

*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*<sup>\*</sup>plasmon@mail.ru*

**Аннотация.** Метод вейвлет анализа был применен для исследования эффекта мигающего света в вакуумной дуге. Эффект мигающего света проявляется в процессе горения вакуумной дуги при подаче дополнительного напряжения питания на разрядный промежуток. Свечение плазмы после подачи дополнительного импульса представляло собой последовательность интенсивных вспышек длительностью 20–50 нс. Эти импульсы следовали с возрастающей амплитудой в течение 200 нс. После этого амплитуда всплесков начинает уменьшаться. В результате статистической обработки было выявлено наличие максимумов в вейвлет спектре, которые соответствуют предполагаемому времени жизни катодного пятна.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга, эктоны, катодное пятно.

### 1. Введение

Катодная дуга имеет ряд свойств, затрудняющих ее использование в промышленном производстве или в исследовательской технике. Одним из таких свойств является возможность внезапного прекращения функционирования дуги без внешних воздействий. Дуговой разряд сам по себе может перейти в нестабильное состояние и погаснуть. Такие процессы часто регистрируются в дугах при различных условиях [1–5]. Эти процессы могут быть объяснены развитием неустойчивостей в плазменном столбе разряда [6] или процессами в катодных пятнах [7].

Эктонная модель катодного пятна позволяет определить условия, при которых происходит внезапное погасание катодного пятна [8]. В этой модели жизненный цикл катодного пятна рассматривается как последовательность активной и скрытой фаз. В скрытой фазе происходит разогрев микроучастка катода проходящим током, при этом не происходит генерации плазмы. В активной фазе происходит электрический взрыв разогретого микроучастка с выбросом плазмы и ростом проводимости. При этом прохождение тока обеспечивается разными взрывными центрами действующими асинхронно. Погасание дуги происходит при синхронизации взрывных процессов, когда в некоторый момент времени все взрывные центры переходят в скрытую фазу и генерация плазмы прекращается.

Данная статья посвящена исследованию процесса резкого изменения тока разряда, который может привести к синхронизации взрывных центров. Исследовалась реакция дугового разряда на ступенчатое изменение напряжения питания.

### 2. Экспериментальная установка и методика

#### *1.1. Электродная система и система питания разряда*

Эксперименты проводились в вакуумной установке Varian при безмасляном вакууме с остаточным давлением  $10^{-8}$  мм.рт.ст. Измерения проводились в малогабаритной камере с подвижными коаксиальными вводами и оптическим окном для регистрации свечения плазмы. Общая схема экспериментальной установки со схемами питания и измерения представлена на Рис. 1.

Питание основного разряда и цепи пробоя осуществлялось с помощью трехканального кабельного генератора КГ (Рис. 1). Кабельный генератор имел линии выдающие прямоугольные импульсы длительностью 1300, 500 и 45 нс синхронизованные по переднему фронту. Амплитуда напряжения для всех каналов была одинаковая и составляла 20, 25 и 30 кВ. Линии 1300 и 500 нс использовались для формирования ступенчатого импульса с использованием кабельной линии задержки (ДЛ) 500 нс. Ток разряда измерялся

малоиндуктивным шунтом 0.3 Ом. Свечение плазмы регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-36. Этот умножитель позволял получить временное разрешение на уровне 8 нс.

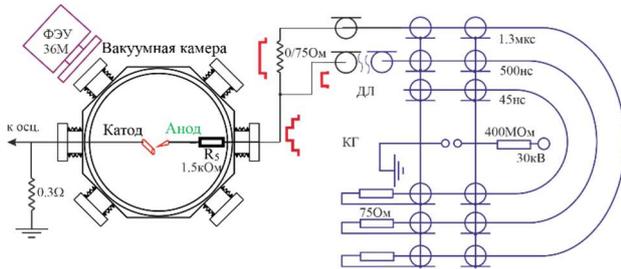


Рис. 1. Экспериментальная установка с использованием многоканального кабельного генератора.

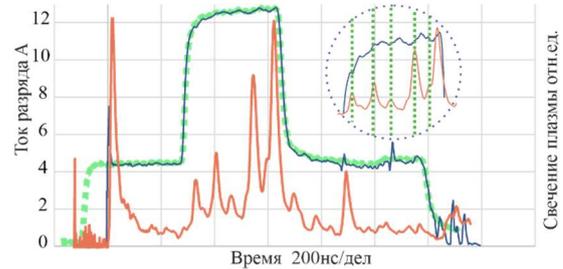


Рис. 2. Типичная осциллограмма Тока разряда и свечения плазмы.

### 1.2. Обработка. Вейвлет преобразование

Для статистического анализа мест появления и длительности вспышек свечения плазмы при скачке тока было проведено вейвлет преобразование [9]. Вейвлет спектры были усреднены по 40 отдельным измерениям. Использовалась формула преобразования вейвлет (1):

$$\omega(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где  $b$  – временной сдвиг,  $a$  – масштаб (ширина вейвлета). Использовалась вейвлет функция типа “мексиканская шляпа” (2):

$$\psi(t) = (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2)$$

Сначала определялись локальные максимумы в спектре длительностей импульсов и после этого строились временные зависимости амплитуд импульсов.

### 1.3. Обработка. Корреляционный анализ

Для выявления соответствия изменения сигнала свечения изменению тока разряда была рассчитана корреляционная функция [10] для производных этих сигналов. Была использована следующая формула для расчета (3).

$$K(\tau) = \int_0^T \frac{dI(t)}{dt} \frac{dL(t+\tau)}{dt} dt, \quad (3)$$

где

$$\tilde{I}(t) = I(t) - \frac{\int_0^T I(t) dt}{T} \quad \tilde{L}(t) = L(t) - \frac{\int_0^T L(t) dt}{T} \quad (4)$$

приведенные сигналы тока и свечения без постоянной составляющей.  $T$  – период измерения,  $\tau$  – смещение по времени. Расчет велся численно по всему периоду измерений без периода  $\tau$  с обеих границ измерения.

## 3. Результаты экспериментов

### 3.1. Эффект мигающего света

Осциллограммы тока разряда свечения плазмы и напряжения на разряде представлены на Рис. 3 и 4.

Измерения тока и свечения (Рис. 2) показывают, что ток разряда (синяя сплошная линия) практически не имеет отклонения от тока короткого замыкания. Скорость роста тока на переднем фронте достигает в среднем  $4.3 \cdot 10^8$  А/с.

На осциллограммах свечения разряда была обнаружена явная особенность. Поток света после резкого увеличения напряжения представляет собой последовательность коротких интенсивных импульсов с увеличивающейся амплитудой. Длительности импульсов составляют 30–40 нс. Период повторения составляет 50–0 нс. Контрольные измерения без ступеньки напряжения показывают отсутствие области как высокоинтенсивных всплесков свечения, так и простого повышения интенсивности света в данной временной области.

### 3.2. Результаты вейвлет анализа

Результаты вейвлет анализа с использованием формул (1) и (2) представлены на Рис. 4–6. Для вольфрамового катода из распределений по длительностям (Рис. 3) были определены локальные максимумы в распределениях длительностей импульсов 24 и 36 нс. Временная зависимость амплитуд этих импульсов представлена на Рис. 4

Для медного катода из распределений по длительностям (Рис. 5) были определены локальные максимумы в значениях 23 и 30 нс. Временная зависимость амплитуд этих импульсов представлена на Рис. 6.

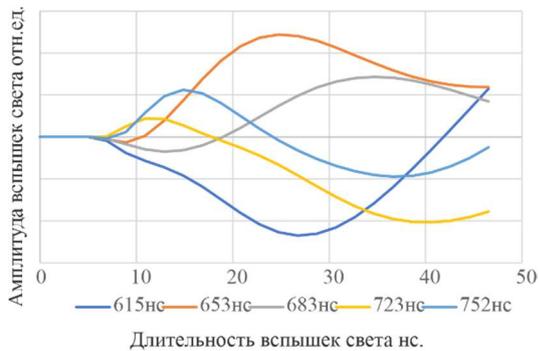


Рис. 3. Часть вейвлет спектра длительностей импульсов свечения. Вольфрамовый катод. Соотношение ступеней 1:3. Амплитуда импульса 30 кВ.

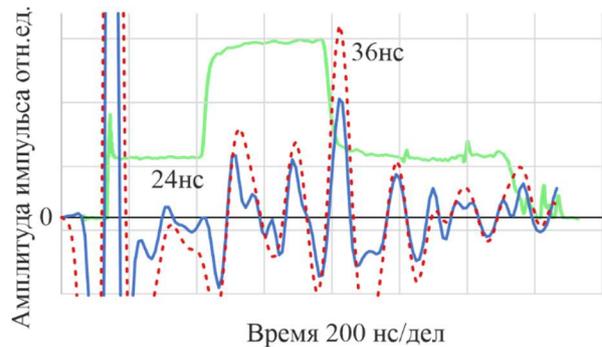


Рис. 4. Временная зависимость амплитуд импульсов длительностью 24 и 36 нс. Вольфрамовый катод. Соотношение ступеней 1:3. Амплитуда импульса 30 кВ.

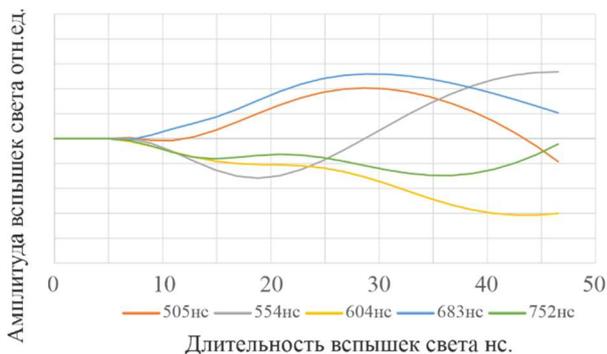


Рис. 5. Часть вейвлет спектра длительностей импульсов свечения. Медный катод. Соотношение ступеней 1:2. Амплитуда импульса 30 кВ.

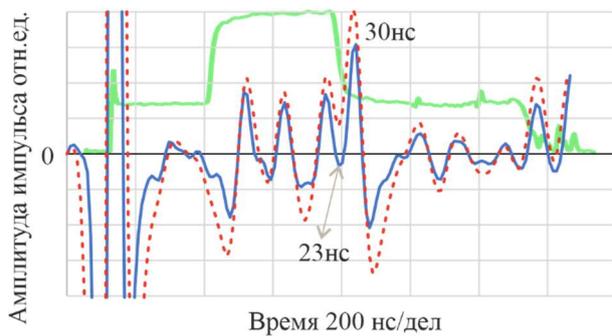


Рис. 6. Временная зависимость амплитуд импульсов длительностью 23 и 30 нс. Медный катод. Соотношение ступеней 1:2. Амплитуда импульса 30 кВ.

Результаты вейвлет анализа показывают, что определенные максимумы в распределении по длительностям совпадают с оценками, сделанными из рассмотрения осциллограмм. При

этом оказывается, что длительности импульсов примерно в 1.6–1.9 раза меньше, чем периоды следования этих импульсов.

Другим важным выводом можно считать тот факт, что появление всплесков света по времени даже на усредненном вэйтлет спектре имеет явные максимумы и минимумы (Рис. 4 и 6), что свидетельствует о синхронизации процесса появления вспышек света с приходом дополнительного импульса. Также усредненные спектры подтверждают факт увеличения амплитуд импульсов во времени после прихода дополнительного импульса.

### 3.3 Результаты корреляционного анализа

Результаты корреляционного анализа с использованием формулы (3) представлены на Рис. 7. Видно, что начало всплесков свечения соответствует с точностью 10 нс локальным подъемам тока. Этот факт вполне объясним. Свечение плазмы пропорционально количеству плазмы. Увеличение количества плазмы ведет к увеличению количества носителей зарядов в промежутке и, как следствие, уменьшению сопротивления промежутка и увеличению тока.



Рис.7. Корреляционная функция тока разряда и свечения плазмы.

Наглядное подтверждение этой корреляции можно увидеть на увеличенном участке тока и свечения на Рис. 2. Видно, что начало всплеска свечения как правило совпадает с началом увеличения тока. Таким образом можно утверждать, что всплески свечения вызываются всплесками генерации плазмы. Такие всплески генерации плазмы могут быть объяснены синхронизацией взрывных процессов в катодных пятнах

## 4. Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволили определить реакцию дугового разряда на приход резкого дополнительного импульса напряжения. Ток дуги реагировал фактически без задержки, тождественно повторяя ток короткого замыкания. Это может быть следствием того, что малое расстояние между катодом и анодом не дает межэлектродной плазме сделать вклад в сопротивление прохождению тока.

Важнейшим результатом проведенного исследования оказался эффект раскачки колебаний свечения плазмы разряда с приходом дополнительного импульса тока. После прихода дополнительного импульса появляются серии интенсивных вспышек света, синхронизированных по времени от измерения к измерению. Это говорит о том, что резкий скачок тока запускает процесс повторяющихся вспышек. Из измерений свечения плазмы известно, что свечение плазмы всегда фактически следует за током разряда. Это может объясняться тем, что чем больше ток, тем больше ячеек катодных пятен присутствует на катоде. Именно катодные пятна являются самыми яркими объектами в дуговом разряде. Следовательно, появление резких всплесков свечения с высокой вероятностью может означать появление и исчезновение ячеек катодных пятен. Такое поведение катодных пятен хорошо описывается эктонной моделью катодного пятна. Длительности вспышек и период их

повторения соответствует оценкам времени жизни катодных пятен и эктонного цикла катодного пятна. Можно сделать предположение, что приход дополнительного импульса синхронизирует жизненные циклы катодных пятен. Катодные пятна одновременно взрываются, вызывая всплеск света и в соответствии с взрывной моделью одновременно остывают, приводя к резкому падению свечения. Эту гипотезу подтверждает также и корреляционная функция изменения тока разряда и свечения плазмы. В этой связи наблюдаемое явление раскачки колебаний света можно с высокой уверенностью считать эффектом синхронизации жизненных циклов катодных пятен.

## 5. Выводы

Проведенные измерения и статистический анализ реакции дугового разряда на приложение дополнительного питающего напряжения с быстрым передним фронтом позволил выявить эффект синхронизации жизненных циклов катодных пятен в дуге (эктонных циклов). Параметры вспышек света, измеренные в эксперименте, хорошо согласуются с данными о длительности жизненных циклов катодных пятен.

## Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360>.

## 6. Список литературы

- [1] B. Jüttner, Cathode spots of electric arcs, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **34**, R103, 2001, doi: 10.1088/0022-3727/34/17/202
- [2] V.F. Puchkarev, A.M. Murzakayev, Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **23**, 26, 1990, doi: 10.1088/0022-3727/23/1/005
- [3] R.P. Smeets, The origin of current chopping in vacuum arcs, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **17**, 303, 1989, doi: 10.1109/27.24640
- [4] D. Feng, S. Xiu, G. Liu, Y. Wang, Y. Zhang, Experimental Investigation of High-Current Vacuum Arc Instability Modes Under Transverse Magnetic Field, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **43**, 4161, 2015, doi: 10.1109/TPS.2015.2496244
- [5] V.N. Zhitomirsky, R.L. Boxman, S. Goldsmith, Unstable arc operation and cathode spot motion in a magnetically filtered vacuum-arc deposition system, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. **13**, 2233, 1995, doi: 10.1116/1.579548
- [6] М.А. Леонтович, *Вопросы теории плазмы. Выпуск 6*. Москва: Атомиздат, 1972.
- [7] S.A. Barenholts, G.A. Mesyats, A.G. Chentsov, Spontaneous extinguishing of a vacuum arc in terms of the ecton model, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **27**, 817, 1999, doi: 10.1109/27.782244
- [8] G.A. Mesyats, *Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: the Breakdown, the Spark and the Arc*. Moscow: Nauka, 2000.
- [9] И. Добеши, *Десять лекций по вейвлетам НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика*. Ижевск, 2001.
- [10] M. Pal, P. Bharati, Introduction to Correlation and Linear Regression Analysis. In: *Applications of Regression Techniques*. Singapore: Springer, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-9314-3\_1