12

Аномальные импульсы тока в поверхностном барьерном разряде

© Д.Ю. Низамов[1], А.В. Лазукин[2], С.А. Зайцев[1]

[1] Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия
E-mail: danilnizamov98@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 июня 2026 г.
В окончательной редакции 22 августа 2026 г.
Принято к публикации 29 августа 2026 г.

Проведен анализ особого класса импульсов тока в поверхностном барьерном разряде, которые не соответствуют по знаку перенесенного заряда полярности питающего напряжения (обратные импульсы). Установлена зависимость количества обратных импульсов от напряжения. Показана связь между дисбалансом заряда, переносимого за положительный и отрицательный полупериоды напряжения, и вероятностью возникновения обратных импульсов в последующем периоде напряжения. Высказывается предположение, что обратные импульсы обусловлены микроразрядами, инициируемыми между областями остаточного заряда на поверхности диэлектрического барьера.

Ключевые слова: поверхностный барьерный разряд, микроразряд, обратные импульсы тока, детектирование импульсов, сверточная нейронная сеть.

DOI: 10.61011/PJTF.2027.01.64116.20807

Поверхностный барьерный разряд (ПБР) — это разновидность газового разряда, формирующегося на поверхности диэлектрика при атмосферном или близком к нему давлении в ограниченной области около электрода с малым радиусом кривизны, называемого „коронирующим“. Второй электрод, называемый „обратным“, в такой системе отделен от области развития разряда диэлектрическим барьером.

ПБР широко внедряется в технику и технологию. Такой вид разряда применяют, например, для генерации озона, управления потоком воздуха, очистки воздуха, обработки поверхностей [1].

При использовании протяженного коронирующего электрода разряд представляет собой совокупность кратковременных микроразрядов (МР), которые распределены вдоль кромки электрода и в совокупности образуют квазиоднородный плазменный слой на поверхности диэлектрика [2]. За каждый период напряжения возникает группа МР. Известно, что часть заряда, перенесенного МР, остается на поверхности барьера после смены периода и влияет на развитие последующих МР [3].

Одним из ведущих направлений в изучении ПБР является представление разряда как совокупности отдельных МР [3,4]. Для этого информация об отдельных МР собирается различными методами, а оценке подлежат паттерны распределения их параметров. Также интерес представляют отдельные классы МР, соответствующие разным формам протекания разряда. Этот подход применяется и к исследованию частичных разрядов в изоляции.

Одним из способов такого изучения МР является регистрация соответствующих им импульсов тока [3,4]. Импульсы тока в ПБР имеют полярность, соответствующую полярности питающего напряжения. Однако в работах о ПБР упоминаются также „обратные“ импульсы [5–7], полярность которых не соответствует полярности питающего напряжения и которые не могут быть объяснены ранним появлением первой группы импульсов под действием осажденного и объемного заряда от предыдущих периодов напряжения.

При визуальном осмотре данных обратные импульсы кажутся редкими и слабо выраженными. Так, авторы работ [6,7] явно указывают на то, что не учитывают обратные импульсы в анализе, рассматривая их как артефакт схемы измерения. Для проверки фактов возникновения обратных МР, оценки их количества и частоты возникновения, а также связи с условиями эксперимента достаточным является проведение длительного эксперимента с накоплением обширной статистики.

Исследуемая в настоящей работе электродная система ПБР питается синусоидальным напряжением частотой 30 kHz. Электроды выполнены из медной фольги толщиной 50 μm, наклеенной на противоположные поверхности диэлектрического барьера, который выполнен из оксида алюминия (относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 9$) и имеет линейные размеры 60×40 mm и толщину 1 mm. Обратный электрод имеет линейные размеры 50×30 mm. Коронирующий электрод имеет линейные размеры 15×10 mm и расположен в центре диэлектрического барьера.

Действующее значение питающего напряжения (далее напряжение) варьировалось от 1800 до 2400 V с шагом в 200 V. Напряжение измерялось с помощью высоковольтного делителя P6015 (Tektronix, полоса пропускания 75 MHz). К обратному электроду был припаян токовый шунт, состоящий из четырех резисторов. Эквивалентное сопротивление шунта $R_{sh} = 50\,\Omega$. Сигнал с

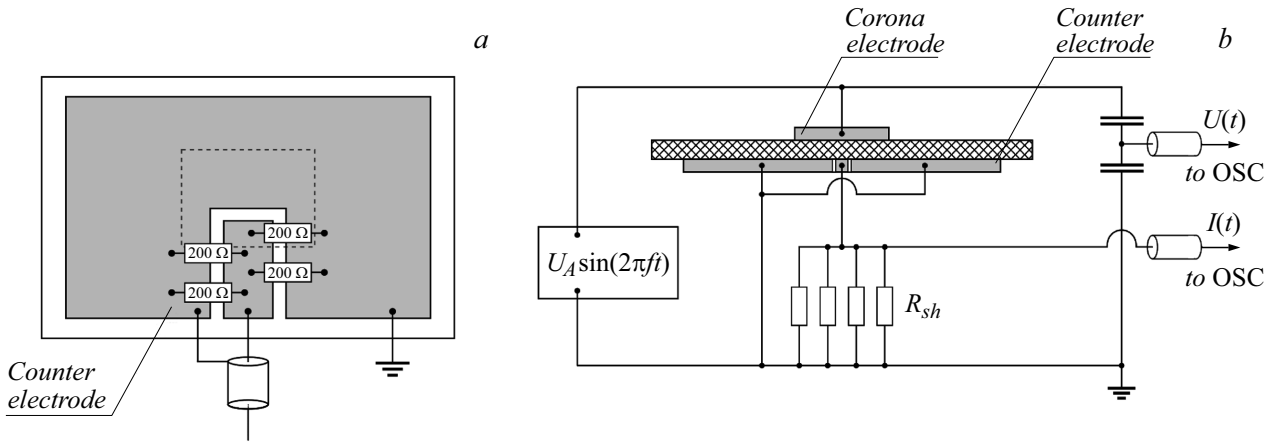


Рис. 1. Изображение исследуемой электродной системы. *a* — вид со стороны обратного электрода, включающий расположение шунтовых резисторов; *b* — вид в сечении с упрощенной схемой подключения системы измерения. *Corona electrode* — коронирующий электрод, *Counter electrode* — обратный электрод.

шунта поступал через кабель с волновым импедансом 50 Ω на вход осциллографа с сопротивлением 50 Ω.

На рис. 1 приведено общее изображение исследуемой электродной системы, включающее как физические размеры и расположение основных компонентов, так и упрощенную схему подключения шунта.

Для каждого варианта питающего напряжения собраны данные, включающие информацию о токе и напряжении за 3000 полных периодов питающего напряжения. Общий объем данных — более 800 млн временны́х точек.

Для проведения анализа такого объема данных необходимо реализовать эффективный отбор импульсов из зашумленного сигнала. Точность оценок коллективных характеристик зависит от способности выделить импульсы, сравнимые по амплитуде с шумовой компонентой. Для решения этой задачи в исследовании был применен оригинальный метод детектирования, включающий два этапа. На первом этапе происходит установка положений импульсов. Полный набор данных разделяется на N участков шириной l_w методом скользящего окна с шагом s_w. Затем для каждого участка сверточная нейронная сеть, обученная по методу, предложенному в [8], предсказывает значения целевой переменной $\mathcal{O}$. Таким образом получается временной ряд $\mathcal{O}(t)$. Локальные максимумы $\mathcal{O}(t)$, превышающие настраиваемый порог, принимаются за положения импульсов. На втором этапе детектирования происходит уточнение границ импульсов с целью повышения точности учета их характеристик (точность определения границ сильно влияет на расчет заряда индивидуального импульса). Границы импульсов уточняются с помощью полносвязной нейронной сети, обученной предсказывать логарифм расстояния от центра импульса до границы.

Предложенный в [8] вариант сверточной нейронной сети показал слабую обобщающую способность и низкую точность. Для решения этой проблемы в настоящей работе были внесены изменения в архитектуру нейронной сети. Во-первых, слой выпрямления $\mathcal{F}$ с прореживанием заменен на слой глобальной подвыборки по среднему $\mathcal{G}$ без прореживания. Во-вторых, в каждый сверточный блок добавлена пакетная нормализация. Таким образом, стохастическая регуляризация заменена на структурную. При этом за счет применения слоя $\mathcal{G}$ из признакового описания убрана временна́я составляющая. Для предсказания значения целевой переменной $\mathcal{O}$ неважно, в каком именно месте входного участка данных был детектирован тот или иной скрытый признак, так как сам факт его наличия несет информацию о расположении импульса тока.

Точность детектирования проверялась по размеченному вручную тестовому набору данных и сравнивалась с точностью методов, предложенных в работах [4,7,9–11]. Метод, использованный в настоящей работе, позволил добиться точности детектирования P (precision), равной 89.35 %, что минимум на 1.37 процентных пункта лучше, чем у альтернативных методов, и полноты детектирования R (recall), равной 88.01 %, что минимум на 5.6 процентных пункта лучше, чем у альтернативных методов.

В результате применения описанного выше метода детектирования ко всему набору данных обнаружено 206 932 импульса тока, из которых 4652 обратных. Для каждого импульса установлены его амплитуда, перенесенный кажущийся заряд (далее заряд), длительность. Все параметры обратных импульсов сопоставимы с соответствующими параметрами „обычных“ (не обратных) импульсов тока. В среднем отношение заряда обычного импульса к заряду обратного составляет 10.51.

Следует отметить, что исследуемая электродная система работала в течение длительного периода времени, и, следовательно, коронирующий электрод подвергался постепенной эрозии под воздействием ПБР. Для снижения дрейфа характеристик разряда электроды подвергались предварительной тренировке под умеренным на-

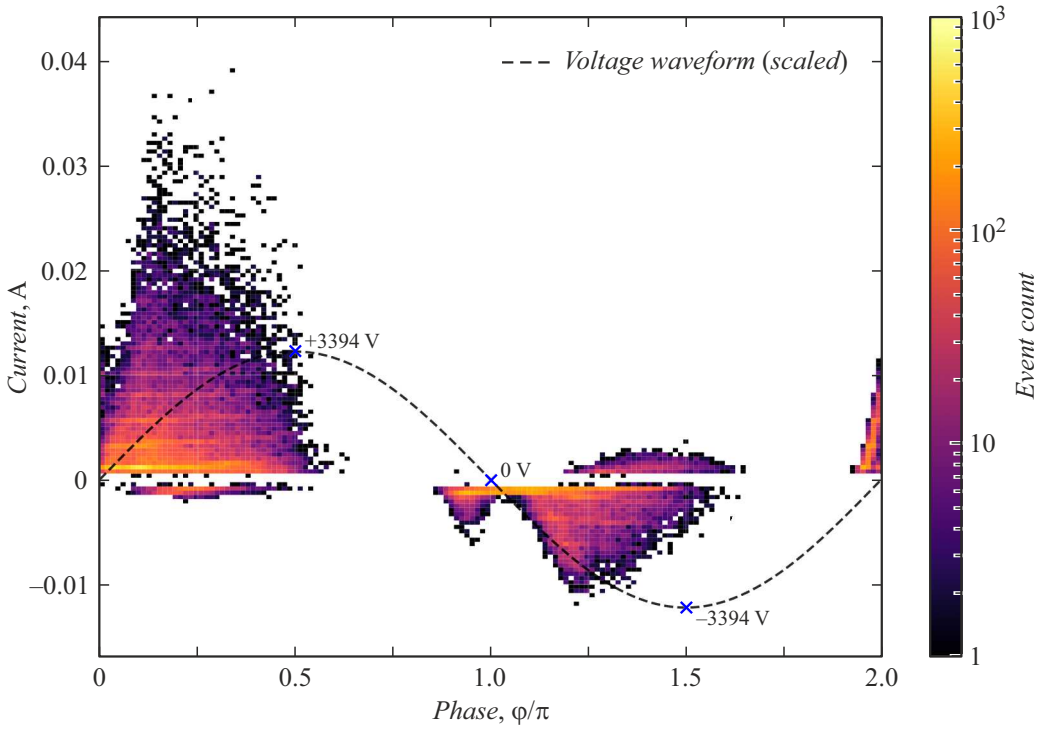


Рис. 2. Распределение амплитуд импульсов тока по фазе питающего напряжения.

пряжением в течение не менее 4 h. В собранных данных не было выявлено существенного изменения статистики каких-либо параметров импульсов тока со временем.

На рис. 2 представлено распределение амплитуд импульсов тока по фазе питающего напряжения при напряжении, равном 2400 V. Хорошо видны группы отрицательных и положительных обратных импульсов (рис. 2). На рис. 3 показана зависимость количества обратных импульсов от действующего значения питающего напряжения.

Статистика параметров обратных импульсов приведена в табл. 1 и 2. Параметры включают среднее количество импульсов на каждые 10^{-4} s, обозначаемое как n, среднюю амплитуду $\bar{A}$, среднюю длительность $\bar{w}$, средний заряд $\bar{Q}$, размах заряда R_Q, межквартильный размах заряда IQR_Q. Обнаруженные зависимости величины заряда и характеристик его распределения от напряжения соотносятся с аналогичными зависимостями для обычных импульсов.

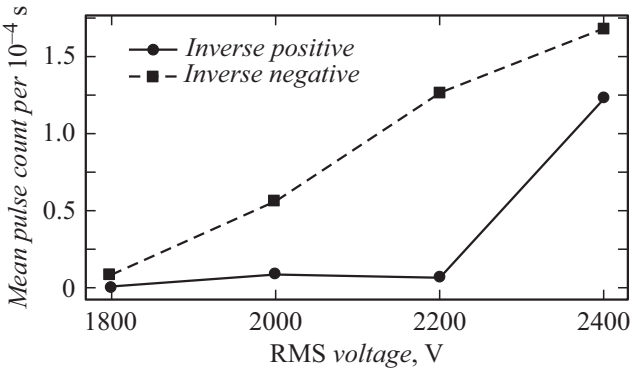


Рис. 3. Зависимость количества обратных импульсов от действующего значения питающего напряжения.

Интерес представляет фаза возникновения первого импульса в рамках одного периода напряжения, которую будем обозначать как $\varphi^{(1)}$. Эта величина указывает на момент выполнения начальных условий для возникновения разряда. Данные о значениях $\varphi^{(1)}$ для всех типов импульсов приведены в табл. 3.

Для всех типов импульсов $\varphi^{(1)}$ постепенно снижается с ростом действующего значения питающего напряжения. Исключение составляют обратные положительные импульсы. Однако их количество при напряжениях 1800–2200 V незначительно, поэтому оценка $\varphi^{(1)}$ сделана приблизительно.

Особенности измерительной системы, а именно положение шунта в цепи заземления обратного электрода, позволяют измерять любые изменения заряда в области над электродной системой, расположенной над измерительной секцией. Из полученных данных видно, что в системе ПБР присутствует определенный средний дисбаланс заряда, перенесенного за отдельные положительные и отрицательные периоды. Дисбаланс оценивался как отношение суммы зарядов всех импульсов $\sum_{j=1}^{M} Q_j$ к сумме модулей зарядов всех импульсов $\sum_{j=1}^{M} |Q_j|$. Дисбаланс заряда равен 0.47 при напряжении 1800 V, 0.52 при 2000 V, 0.66 при 2200 V, 0.73 при 2400 V.

Таблица 1. Параметры обратных положительных импульсов тока

$\bar{U}$, V	n	$\bar{A}$, A	$\bar{w}$, ns	$\bar{Q}$, pC	R_Q, pC	IQR_Q, pC
1800	0.005	0.00046	12.1	1.125	0.29	0.2
2000	0.083	0.00081	9.91	1.797	5.55	0.71
2200	0.067	0.00087	9.72	2.137	3.54	0.83
2400	1.23	0.00123	8.41	2.953	11.07	1.41

Таблица 2. Параметры обратных отрицательных импульсов тока

$\bar{U}$, V	n	$\bar{A}$, A	$\bar{w}$, ns	$\bar{Q}$, pC	R_Q, pC	IQR_Q, pC
1800	0.079	−0.00059	7.39	−0.98	2.51	0.66
2000	0.562	−0.00078	7.10	−1.308	6.1	0.66
2200	1.269	−0.00093	6.84	−1.59	1.7	0.944
2400	1.684	−0.001	7.13	−1.946	6.348	1.069

Таблица 3. Средняя фаза возникновения первого импульса разных групп

$\bar{U}$, V	$\varphi^{(1)}$, φ/π			
	Обратные отрицательные импульсы	Обычные положительные импульсы	Обратные положительные импульсы	Обычные отрицательные импульсы
1800	0.3193	0.0783	0.8318	1.02
2000	0.2763	0.0473	1.359	0.99
2200	0.2198	0.032	1.35	0.989
2400	0.2194	0.019	1.383	0.98

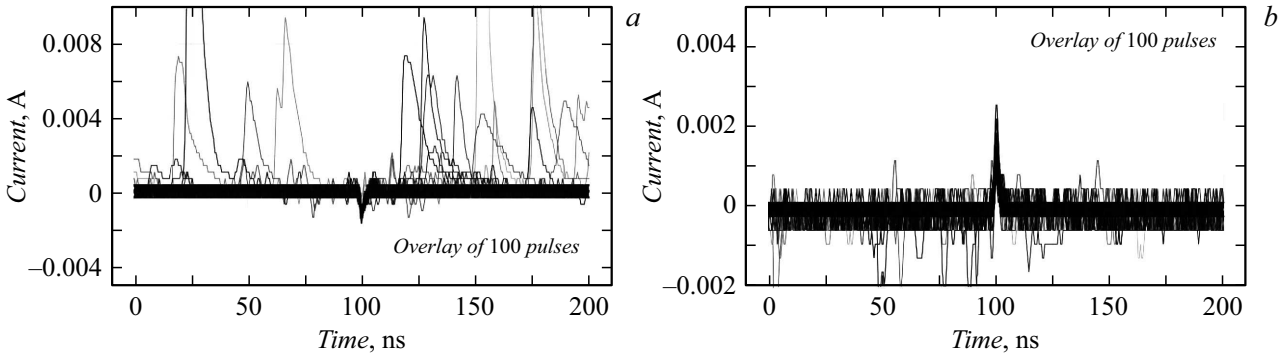


Рис. 4. Обобщенная форма обратных импульсов, полученная наложением импульсов и их окружения. *a* — обратные отрицательные импульсы, *b* — обратные положительные импульсы.

Часть дисбаланса заряда может быть объяснена недоучетом некоторого количества наименее выраженных импульсов, амплитуда которых сопоставима с амплитудой шума. Однако исследование референсных данных, полученных при напряжении 1600 V, показало, что дисбаланс заряда сохраняется даже при почти полном отсутствии шума. Вероятно, часть заряда остается на поверхности барьера не только после смены периода питающего напряжения, но и после начала новой фазы перезарядки барьера.

Вероятность возникновения положительного обратного импульса увеличивается с ростом дисбаланса в предшествующем периоде напряжения, что может свидетельствовать о влиянии накопления заряда на поверхности барьера на протекание ПБР. Так, при дисбалансе заряда 0.55−0.65 эмпирическая вероятность возникновения обратного импульса в следующем периоде составила 33 % (на основе анализа 615 пар последовательных периодов), а при дисбалансе заряда, превышающем 0.75, — 39.5 % (на основе анализа 1332 пар последовательных периодов).

На рис. 4 приведен вид обобщенной формы обратного импульса и его окружения, полученный наложением графиков 100 обратных импульсов друг на друга.

Таким образом, проведенный анализ большого объема данных позволил выявить существенное количество обратных импульсов тока в ПБР. Зависимость количества обратных импульсов от напряжения и зависимость вероятности их появления от дисбаланса заряда позволяют предположить, что обратные импульсы могут быть связаны с микроразрядами, развивающимися между областями заряда на барьере. Такие микроразряды могут быть частью комплекса процессов, составляющих ПБР. Планируется провести опыт, включающий уточнение зависимости количества обратных положительных импульсов от напряжения путем исследования ПБР в описанной электродной системе при напряжениях выше 2400 V, а также применение ФЭУ для регистрации излучения отдельных МР с целью установления соответствия между токовыми характеристиками и излучением МР.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Brandenburg, K.H. Becker, K.-D. Weltmann, Plasma Chem. Plasma Process., **43** (6), 1303 (2023). DOI: 10.1007/s11090-023-10364-5
[2] М.В. Соколова, К.В. Козлов, С.А. Кривов, В.Г. Самойлович, П.А. Татаренко, Письма в ЖТФ, **35** (5), 22 (2009). https://journals.ioffe.ru/articles/12159 [M.V. Sokolova, K.V. Kozlov, S.A. Krivov, V.G. Samoilovich, P.A. Tatarenko, Tech. Phys. Lett., **35** (3), 207 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009030043]
[3] Ю.С. Акишев, Н.А. Дятко, И.В. Кочетов, А.В. Петряков, T. Shao, C. Zhang, S. Zhang, Физика плазмы, **52** (1), 134 (2026). DOI: 10.31857/S0367292126010086 [Yu.S. Akishev, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, A.V. Petryakov, T. Shao, C. Zhang, S. Zhang, Plasma Phys. Rep., **52** (1), 101 (2026). DOI: 10.1134/S1063780X25604328]
[4] A. Lazukin, T. Chernyshev, D. Krivoruchko, Phys. Plasmas, **26** (3), 033513 (2019). DOI: 10.1063/1.5083182
[5] G.J. Pietsch, M. Haacke, in *Proc. of the 14th Ozone World Congress* (International Ozone Association, Dearborn, MI, 1999), vol. 1, p. 311–323.
[6] И.В. Селивонин, *Влияние деградации коронирующего электрода на характеристики поверхностного барьерного разряда*, автореф. канд. дис. (Объединенный институт высоких температур РАН, М., 2022). https://jiht.ru/science/dissert-council/referat/SelivoninIV/Avtoreferat.pdf
[7] C. Piferi, R. Barni, H.E. Roman, C. Riccardi, Appl. Sci., **11** (5), 2079 (2021). DOI: 10.3390/app11052079
[8] M. Azib, B. Renard, P. Garnier, V. Génot, N. André, arXiv:2311.15654 (2023). DOI: 10.48550/arXiv.2311.15654
[9] С. Ван, В.Л. Елисеев, Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, № 1, 15 (2025). https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2025/01/015-025.pdf
[10] G. An, Z. Huang, Y. Li, Sci. Rep., **13** (1), 14149 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-41177-3
[11] L.C. Castro Heredia, A. Rodrigo Mor, J. Wu, Int. J. Electr. Power Energy Syst., **122**, 106192 (2020). DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106192