CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52

УДК 615.47

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЮЩИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ АТМОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

А. Н. ОСИПОВ, Т. МА, В. А. РОКАЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Приведены результаты анализа изменения нелинейного импеданса плазмы диэлектрического барьерного разряда. Нелинейные свойства плазмы больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды. Регистрируемые электрические параметры тока в выходной цепи генератора отражают изменения плазмы, вызванные изменением возбуждающего плазму напряжения, геометрии разрядной системы, расхода потока газа. Экспериментально получены проходные вольт-амперные характеристики плазмы. Установлены зависимости их изменения от амплитуды возбуждающего напряжения в выходной цепи генератора, потока инертного газа и расстояния между электродами разрядной системы.

Ключевые слова: низкотемпературная атмосферная плазма, диэлектрический барьерный разряд, нелинейный импеданс, амплитудный спектр, вольт-амперная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Осипов, А. Н. Анализ электрических сигналов, возбуждающих низкотемпературную атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда / А. Н. Осипов, Т. Ма, В. А. Рокач // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 44–52. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52.

ANALYSIS OF ELECTRICAL SIGNALS EXCITING LOW-TEMPERATURE ATMOSPHERIC PLASMA OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

ANATOLIY N. OSIPOV, T. MA, V. A. ROKACH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This paper presents the results of analyzing the change in the nonlinear impedance of plasma in a dielectric barrier discharge. The volt-ampere characteristics of the plasma were obtained experimentally. The dependencies of their changes on the amplitude of the excitation voltage in the generator's output circuit, the flow rate of the inert gas, and the distance between the electrodes of the discharge system were determined.

Keywords: low-temperature atmospheric plasma, dielectric barrier discharge, nonlinear impedance, amplitude spectrum, volt-ampere characteristic.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Osipov A. N., Ma T., Rokach V. A. (2025) Analysis of Electrical Signals Exciting Low-Temperature Atmospheric Plasma of Dielectric Barrier Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 44–52. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52 (in Russian).

Введение

Сфера применения технологии холодной атмосферной плазмы (ХАП) достаточно обширна. Основные наиболее важные области – микроэлектроника (производство изделий), оптика (обработка и нанесение покрытий), химическая промышленность и получение новых материалов (изменение свойств поверхности различных материалов неразрушающим способом), охрана окружающей среды (технологии очистки воды, воздуха и др.), биология и здравоохранение (ап-

паратура и технологии стерилизации и терапии) и др. Преимуществами обработки в низкотемпературной плазме при атмосферном давлении являются отсутствие необходимости создания и поддержания вакуума в громоздких системах, возможность работы с различного рода материалами, в том числе низкотемпературными полимерами и биологическими объектами, низкая стоимость оборудования в сравнении с вакуумно-плазменным оборудованием, мобильность и универсальность применения.

В [1] опубликована дорожная карта плазмы на 2022–2027 гг., в соответствии с которой приоритетные задачи на указанный период – новые подходы к возбуждению и генерации плазменных разрядов, диагностика и моделирование плазмы. Таким образом, решение задач диагностики и моделирования ХАП является ключевым на данном этапе развития технологии. Параметры плазмы исследовались с помощью оптических, спектроскопических, микроволновых методов и электрических зондов. Поскольку плазма интерпретируется как элемент с нелинейным импедансом, решение задачи аналитического моделирования является весьма сложным [2]. Однако численное моделирование генерации ХАП, основанное на решении уравнений электростатики и гидродинамического движения заряженных частиц в электрическом поле в привязке к конкретной геометрии разрядной системы, не может быть использовано для прогнозирования параметров плазмы в случае изменения параметров разряда (амплитуды возбуждающего сигнала, расхода газа и т. д.). Одним из подходов решения данной проблемы является анализ отклика тока при воздействии напряжения на нелинейный элемент (атмосферную плазму) [3, 4]. Для численного решения задачи необходимо располагать дискретными значениями проходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейного сопротивления: множеством значений воздействующего мгновенного напряжения и соответствующих им мгновенных токов. Такой массив данных может быть получен экспериментальным путем. В связи с этим в статье приведено исследование проходной вольт-амперной характеристики ХАП в зависимости от параметров электрических сигналов, возбуждающих плазму, расхода инертного газа, геометрии разрядной системы.

Упрощенная электрическая модель выходного каскада генератора плазмы

На рис. 1 представлена упрощенная электрическая схема типового выходного каскада генератора ХАП для генерации ХАП разрядом DBD. Согласно [2], повышающий трансформатор (ПТ), электроды и другие элементы разрядной системы совместно с генерируемой плазмой образуют колебательный контур, который обладает резонансными свойствами. Напряжение с задающего генератора $U_г$ подается на первичную обмотку трансформатора. Напряжение возбуждения $U_{возб}$ со вторичной обмотки поступает на электроды разрядной системы, которые на схеме представлены эквивалентными емкостями $C_{эл1}$ и $C_{эл2}$, и далее подается на нагрузочное сопротивление $Z_{пл}$. Емкости $C_{эл}$ состоят из высоковольтного электрода и диэлектрического слоя, покрывающего этот электрод, а $Z_{пл}$ определяется эквивалентным сопротивлением плазмы. Таким образом, низкотемпературная плазма атмосферного давления, взаимодействующая с поверхностью объекта, является нелинейной нагрузкой для высоковольтного источника переменного тока в цепи с периодическим источником сигнала.

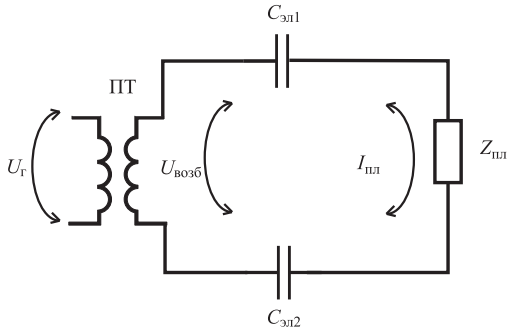


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная электрическая схема выходного каскада генератора холодной атмосферной плазмы
Fig. 1. Simplified equivalent electrical circuit of the output stage of a cold atmospheric plasma generator

В [5, 6] предложен способ диагностики и контроля взаимодействия плазмы с поверхностью объекта на основе параметров сигналов, возбуждающих плазму (мгновенных значений

напряжения и тока). В данной статье эти же сигналы использованы для анализа импедансных свойств плазмы. В качестве датчика тока в высоковольтной цепи применено устройство на основе оптопары [7].

Проведение исследований

Для проведения исследований в области анализа электрических сигналов, возбуждающих плазму диэлектрического барьерного разряда, использовался экспериментальный стенд, включавший в себя генератор сигналов OWON AG4151, осциллограф OWON XDS3204AE, высоковольтный преобразователь (трансформатор), датчик тока, регулятор расхода газа РРГ-10 с блоком управления БУИП-1М, а также разрядную систему с электродами (рис. 2).

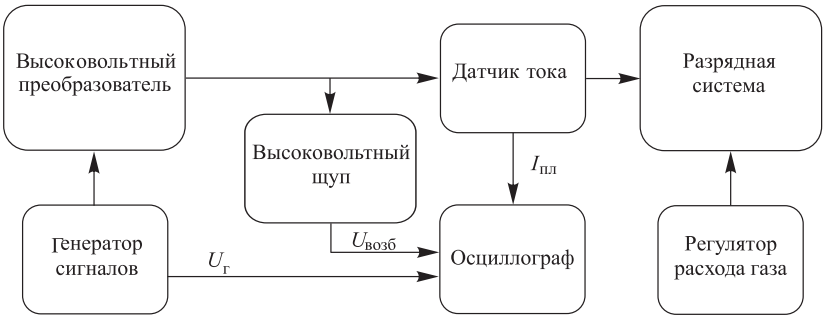


Рис. 2. Структурная схема исследовательского стенда
Fig. 2. Structural diagram of the research stand

Плазма формируется в коаксиальной разрядной системе с использованием инертного газа аргона (Ar), что создает плазменный факел длиной до 3 см и диаметром около 1 см.

Анализ отклика (тока) нагрузочного сопротивления на воздействие напряжением гармонической формы выполняли с помощью дискретного преобразования Фурье. В первичную обмотку ПТ подавался периодический сигнал прямоугольной формы с частотой, близкой к резонансной частоте выходного контура – 50 кГц. Подача сигнала прямоугольной формы была вызвана технической реализуемостью генератора. В результате во вторичной обмотке ввиду наличия реактивных элементов (вторичной обмотки трансформатора, емкости электродов разрядной системы и емкостных свойств самой плазмы) сигнал напряжения приобретал синусоидальную форму. Регистрировались сигналы напряжений и токов в нагрузке. Далее в соответствии с [8] вычислялись спектры сигналов напряжения и тока. Анализ линейности сопротивления нагрузки осуществляли на основе сравнения спектра отклика (тока) к спектру вызвавшего его воздействия (напряжения). По измеренным зависимостям изменения напряжения на электродах разрядной системы от времени и тока, протекающего между электродами, строили ВАХ нагрузочного сопротивления.

Методика исследования

На первом этапе экспериментов исследовали изменения ВАХ при изменении амплитуды напряжения на электродах в диапазоне от 3,5 до 8,0 кВ. Изменение напряжения выполнялось посредством изменения напряжения в первичной обмотке трансформатора и контролировалось высоковольтным щупом на электродах. В память цифрового осциллографа параллельно по трем каналам записывались результаты измерений: напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора $U_г$, напряжения $U_{возб}$ на электродах разрядной системы, сигнала с датчика тока $I_{пл}$, протекающего между электродами. Время регистрации составляло 200 мкс, частота дискретизации – 200 МГц, частота сигнала на входе трансформатора – 50 кГц, расход газа – 25 л/ч.

На втором этапе исследовали влияние изменения ВАХ при изменении расхода потока инертного газа через разрядную систему. Расход газа изменялся посредством регулятора расхода газа в диапазоне от 25 до 125 л/ч. Амплитуда напряжения на электродах составляла 5,5 кВ. В памяти осциллографа фиксировались параметры зависимости напряжения и тока на (через) электродах разрядной системы от времени. На третьем этапе измеряли напряжение $U_{возб}(t)$ и ток $I_{пл}(t)$ при изменении межэлектродного расстояния. Наружный электрод перемещался относительно конца внутреннего электрода, расположенного в кварцевой трубке, на расстояние от (–5) до (+5) мм с шагом 1 мм (рис. 3). Амплитуда напряжения составляла 5,5 кВ, расход газа – 25 л/ч.

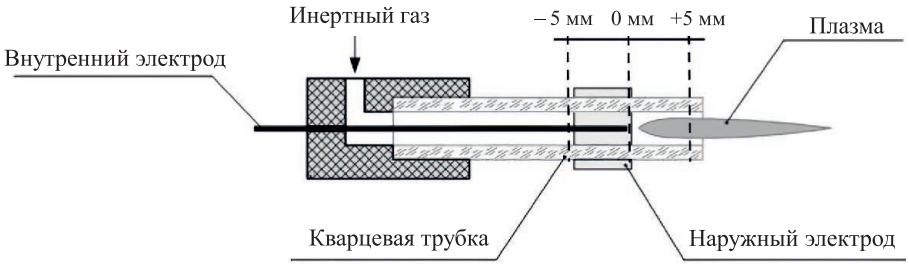


Рис. 3. Изменение положения электродов разрядной системы
Fig. 3. Change in the position of the electrodes of the discharge system

Построение проходных ВАХ на основе зафиксированных на первом, втором и третьем этапах исследований зависимостей напряжений и токов от времени выполнялось в среде MathCAD.

Результаты исследований

На рис. 4 представлены временные диаграммы напряжений в первичной обмотке ПТ и на электродах разрядной системы и тока, протекающего между ними. На вход трансформатора подавалось периодическое напряжение прямоугольной формы (рис. 4, *a*). В выходной цепи генератора наблюдался сигнал синусоидальной формы (рис. 4, *b*), что объясняется наличием реактивных сопротивлений элементов (обмотка ПТ, емкость электродов, плазма).

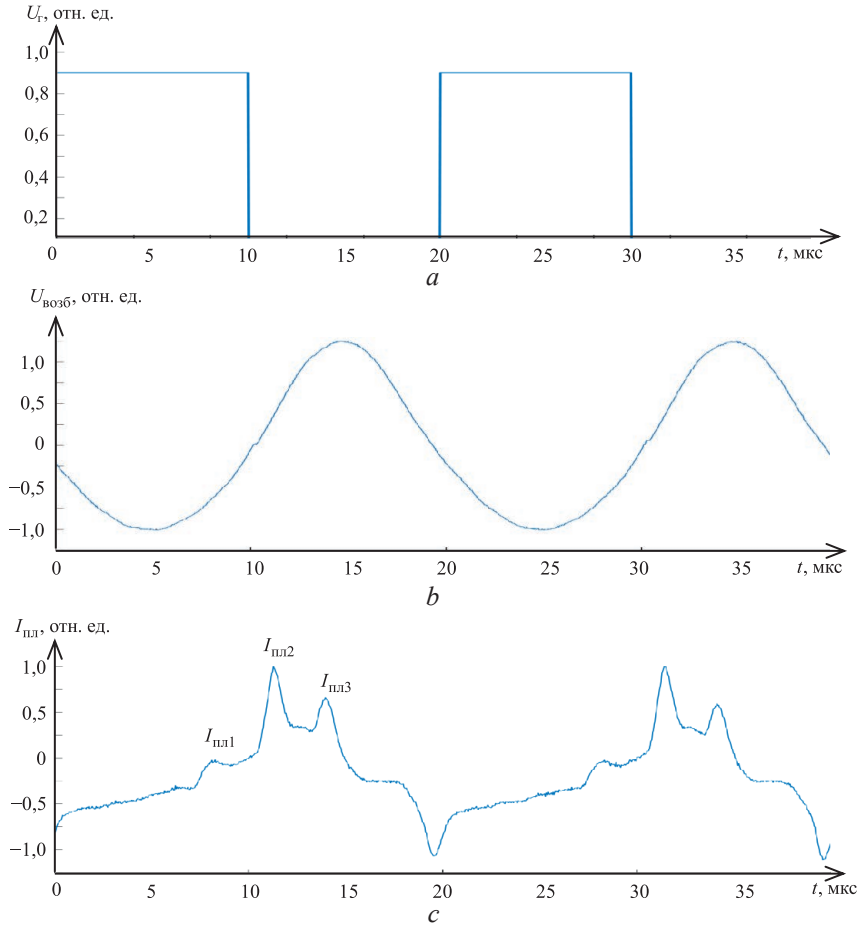


Рис. 4. Изменения напряжения и тока в выходной цепи генератора плазмы:
a – напряжение $U_г$ на входе повышающего трансформатора;
b – напряжение возбуждения $U_{возб}$ на выходе повышающего трансформатора;
c – ток $I_{пл}$, протекающий через электроды разрядной системы
Fig. 4. Changes in voltage and current in the output circuit of the plasma generator:
a – input voltage U_g of the step-up transformer; *b* – excitation voltage U_{ex} at the output of the step-up transformer;
c – current I_p flowing through the discharge system electrodes

Зависимость тока от времени, считанная с датчика тока, представлена на рис. 4, *c*. Форма отклика $I_{пл}(t)$ электрической цепи (плазмы) содержит несколько локальных экстремумов ($I_{пл1}$, $I_{пл2}$, $I_{пл3}$) и существенно отличается от формы задающего гармонического воздействия $U_{возб}(t)$. При этом наблюдается сдвиг фаз между током и напряжением: ток опережает напряжение. Это свидетельствует о том, что при проведении эксперимента в выходном контуре преобладала емкостная составляющая реактивного сопротивления, а частота сигнала возбуждения плазмы отличалась от резонансной. Ввиду сложной формы тока, сдвиги фаз, измеренные на разных уровнях амплитуд, имеют различные значения в разные моменты времени (периода). Так, при возрастании напряжения на уровне нуля сдвиг фаз составляет 18°, а при уменьшении напряжения – 11°. Таким образом, данные параметры характеризуют и определяются изменением импеданса плазмы.

На рис. 5 представлены амплитудные спектры сигналов напряжения и тока. Спектр напряжения – квазигармонический и содержит несколько гармоник, т. е. задающий сигнал несколько отличается от синусоидального. Это объясняется тем, что на вход ПТ подавался прямоугольный сигнал. Спектр отклика (зависимость тока) – мультигармонический и содержит существенно больше гармоник, чем амплитудный спектр сигнала напряжения. Соответственно эффективная ширина полосы спектра *f* сигнала напряжения $U_{возб}$, определенная согласно [9], составляет 125 кГц, а эффективная полоса спектра *f* сигнала тока $I_{пл}$ – 425 кГц, т. е. в 3,4 раза больше. Изменение формы сигнала-отклика при воздействии гармоническим сигналом, соответственно и расширение эффективной полосы спектра, свидетельствуют о нелинейном сопротивлении нагрузки (плазмы) цепи.

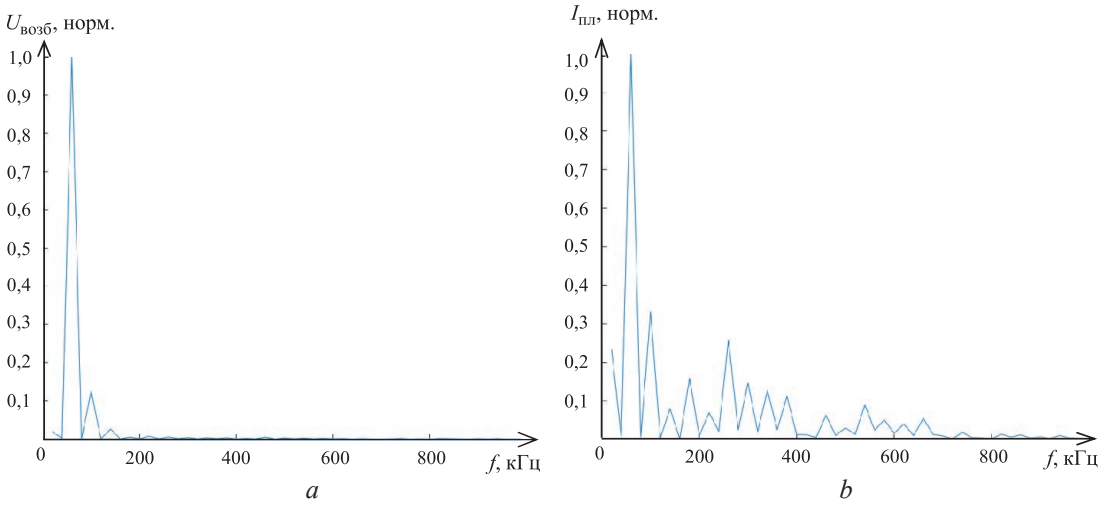


Рис. 5. Амплитудные спектры: *a* – напряжения; *b* – тока
Fig. 5. Amplitude spectrum: *a* – voltage; *b* – current

Исследовали влияние амплитуды напряжения, возбуждающего плазму, расхода инертного газа и расстояния между электродами разрядной системы на ВАХ холодной атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда. Для анализа изменения импеданса плазмы от параметров генератора и разрядной системы строили проходную ВАХ нагрузки выходной цепи генератора. Расход потока газа составлял 25 л/ч, напряжение на электродах – 5,5 кВ.

На рис. 6 представлена проходная ВАХ, построенная на основе измеренных нормированных зависимостей напряжения и тока от времени. ВАХ имеет сложный гистерезисный характер, соответственно угол наклона принимает как положительные, так и отрицательные значения. Это объясняется наличием реактивной составляющей импеданса нагрузки.

Зависимости изменения тока, протекающего через электроды, при изменении амплитуды напряжения представлены на рис. 7. Наблюдаются изменение (сдвиг) положения локальных экстремумов токов относительно оси времени и непропорциональное изменение их амплитуд. При увеличении амплитуды напряжения виден не только рост амплитуды тока, но также происходит некоторое изменение формы тока – она приближается к синусоидальной. Сдвиг фаз между током и напряжением, определенный на уровне нулевой амплитуды, не изменяется. Следует отметить, что отличие формы тока $I_{пл}(t)$ от синусоидальной, а значит, и нелинейные свойства плазмы, больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды.

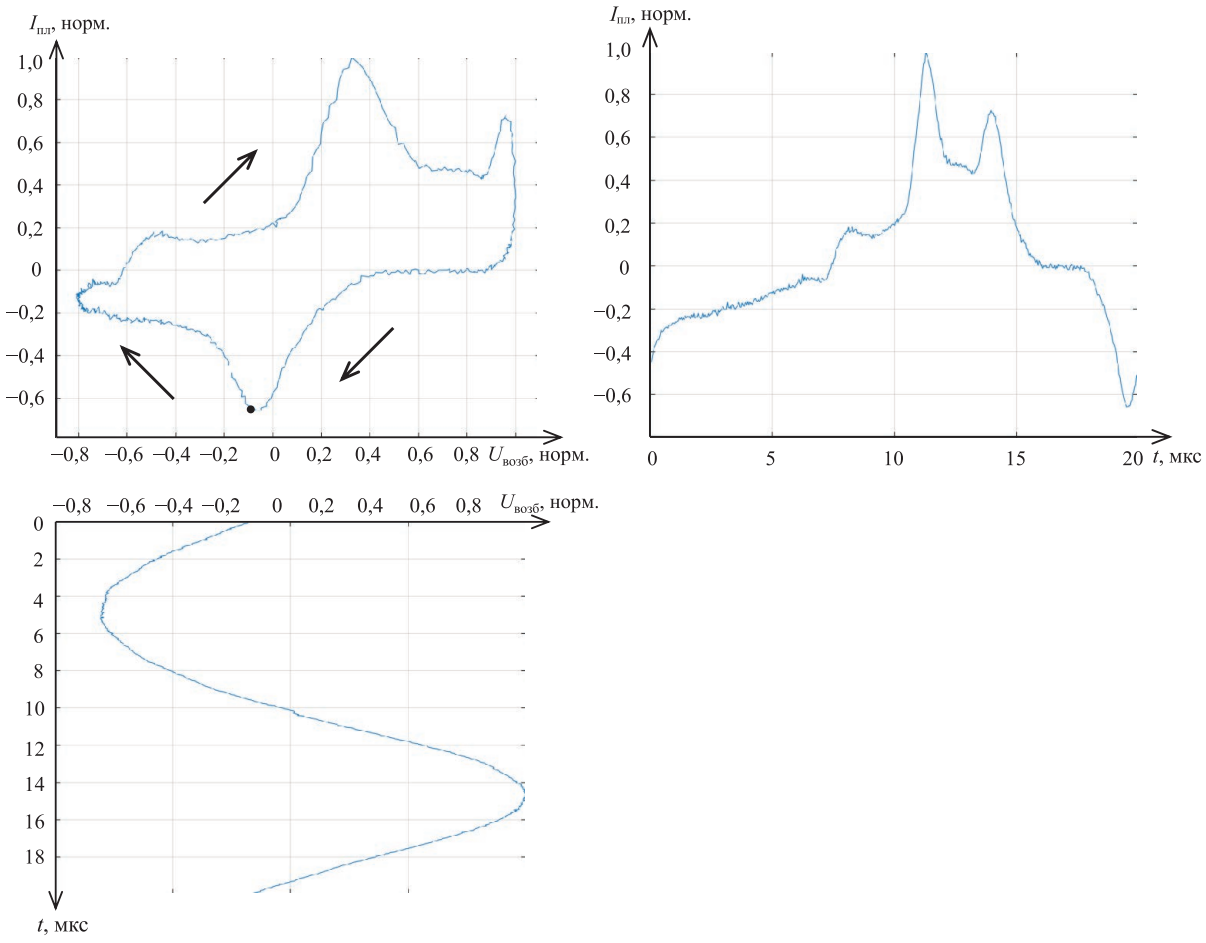


Рис. 6. Проходная вольт-амперная характеристика нагрузки генератора плазмы
Fig. 6. Volt-ampere characteristic of the plasma generator load

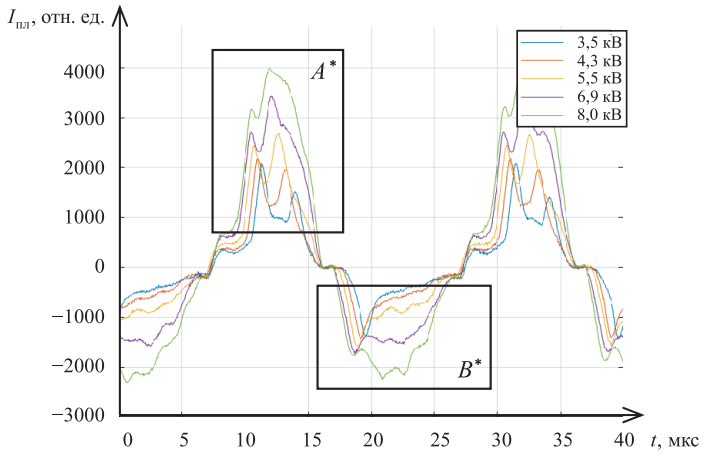
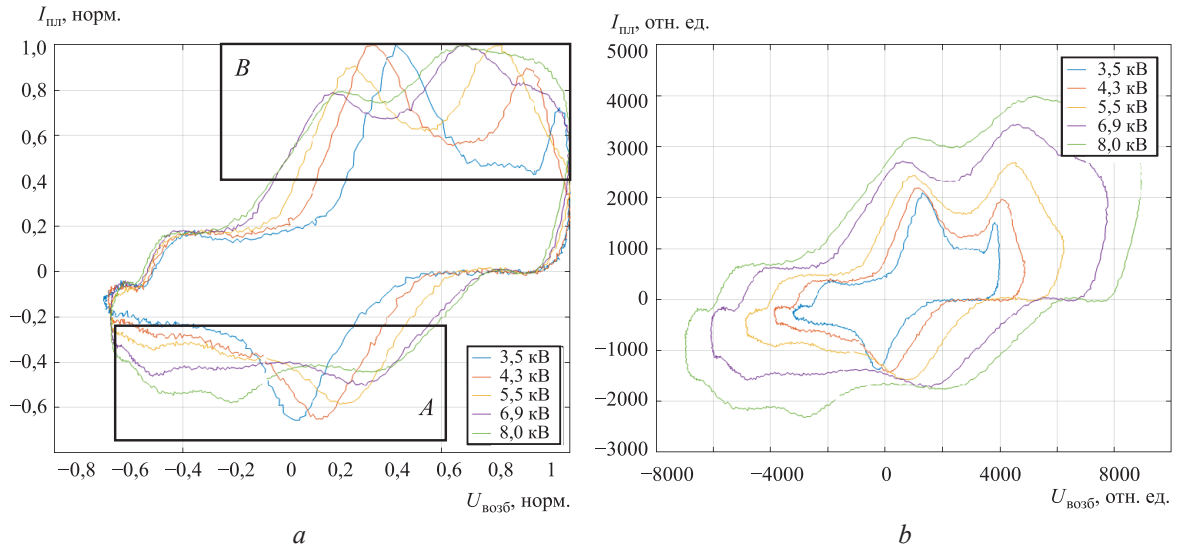


Рис. 7. Зависимость тока нагрузки от времени при различных напряжениях на электродах разрядной системы
Fig. 7. Dependence of load current on time at different voltages on the electrodes of the discharge system

Изменения формы сигналов подтверждают проходные ВАХ плазмы, построенные при различных напряжениях на электродах разрядной системы (рис. 8). Как следует из рис. 8, *а*, существенные изменения формы ВАХ характерны для областей *A* и *B*. Эти области соответствуют участкам A^*, B^* на рис. 7. Увеличение амплитуды $U_{возб}$ приводит к увеличению площади $S_{ВАХ}$, ограниченной кривой ВАХ. В табл. 1 представлены значения $S_{ВАХ}$ для различных напряжений возбуждения плазмы.



a *b*

Рис. 8. Проходные вольт-амперные характеристики плазмы при различных напряжениях на электродах разрядной системы для значений токов и напряжений:
a – нормированных; *b* – относительных

Fig. 8. Transitional volt-ampere characteristics of plasma at different voltages on the electrodes of the discharge system for values of currents and voltages:
a – normalized; *b* – relative

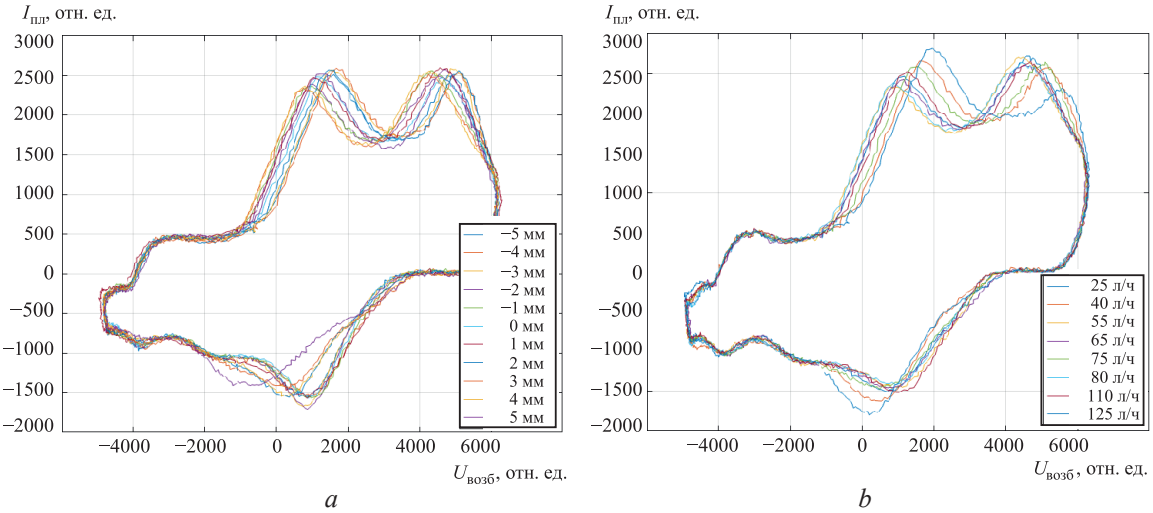
Таблица 1. Ограничение площади вольт-амперной характеристики при изменении напряжения возбуждения плазмы

Table 1. Limitation of the area of the volt-ampere characteristic when changing the plasma excitation voltage

$U_{возб}$, кВ	3,5	4,3	5,5	6,9	8,0
$S_{ВАХ}$, отн. ед.	8,4	13,0	22,5	39,8	57,6

Увеличение напряжения $U_{возб}$ в 2,3 раза привело к увеличению площади $S_{ВАХ}$ в 6,8 раза. Таким образом, изменение напряжения возбуждения плазмы приводит к изменению формы тока, протекающего между электродами, а значит, – к изменению импеданса плазмы.

На рис. 9, *a*, *b* представлены семейства ВАХ соответственно при изменении положения электродов и расхода потока газа. Изменение данных параметров приводило к некоторому изменению формы и площади, ограниченной ВАХ. Для оценки этих изменений рассчитаны площади $S_{ВАХ}$, периметры кривых $L_{ВАХ}$ и параметр $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$. Результаты вычислений приведены в табл. 2, 3.



a *b*

Рис. 9. Вольт-амперные характеристики плазмы при различных:
a – расстояниях между электродами; *b* – расходах потока газа

Fig. 9. Volt-ampere characteristics of plasma at different: *a* – distances between electrodes; *b* – gas flow rates

Таблица 2. Площадь вольт-амперных характеристик и параметр $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ при различном межэлектродном расстоянии
Table 2. The area of the volt-ampere characteristics and the parameter S_{VAC}/L_{VAC} at different interelectrode distances

Расстояние, мм	–5	–4	–3	–2	–1	0	1	2	3	4	5
S	2,089	2,141	2,149	2,174	2,198	2,131	2,279	2,147	2,149	2,168	2,109
S/*L*	701,3	712,4	725,3	728,1	750,5	723,2	756,3	719,6	733,6	732,4	721,1

Таблица 3. Площадь вольт-амперных характеристик и параметр $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ при различном расходе газа
Table 3. The area of the volt-ampere characteristics and the parameter S_{VAC}/L_{VAC} at different gas flow rates

Расход газа, л/ч	25	40	55	65	75	80	110	125
S	2,327	2,299	2,328	2,309	2,302	2,324	2,329	2,324
S/*L*	775,908	756,927	771,826	767,321	775,481	777,731	785,887	769,502

Анализ полученных данных показал, что изменение межэлектродного расстояния на 5 мм приводит к незначительному, менее 5 %, изменению площади ВАХ. При этом происходит более значительное изменение формы ВАХ – параметр $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ изменяется на 9,2 %. Увеличение расхода потока газа в пять раз – с 25 до 125 л/ч – незначительно сказывалось на изменении импеданса плазмы. Так, изменение площади составляло менее 2 %, а параметра $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ – менее 4 %. Следовательно, изменения электрических сигналов, полученные при разных расходах потока газа, не столь значительны по сравнению с изменениями, вызванными различными напряжениями возбуждения плазмы или расстояниями между электродами разрядной системы.

Заключение

1. Подтверждено, что атмосферная плазма характеризуется нелинейным импедансом. Об этом свидетельствует изменение формы тока (отклика) нагрузки (плазмы) на воздействие гармоническим напряжением соответственно на расширение эффективной полосы и структуры амплитудного спектра тока. При проведении исследований на частоте, близкой к резонансной, наблюдался сдвиг фаз между током и напряжением, причем ток опережал напряжение, что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей в выходной цепи генератора. Нелинейные свойства плазмы больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды. При изменении различных параметров генератора для оценки изменения импеданса плазмы построены ее проходные вольт-амперные характеристики, которые имеют сложный гистерезисный характер.

2. Установлено, что регистрируемые электрические параметры тока в выходной цепи генератора отражают изменения плазмы, вызванные изменением возбуждающего плазму напряжения, геометрии разрядной системы, расхода потока газа. Увеличение напряжения $U_{возб}$ в 2,2 раза приводит к увеличению площади $S_{ВАХ}$ в 6,8 раза, изменение межэлектродного расстояния на 5 мм – к незначительному (менее 5 %) изменению площади проходной вольт-амперной характеристики. При этом существенно меняется параметр $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ – на 9,2 %. Изменения геометрии вольт-амперных характеристик при увеличении расхода потока газа с 25 до 125 л/ч не столь ощутимы (площади – менее 2 %, параметра $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$ – менее 4 %) по сравнению с изменениями, полученными при различных напряжениях возбуждения плазмы или расстояниях между электродами.

3. Результаты исследований могут быть использованы при численном моделировании атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда, а также при выборе оптимальных режимов работы генераторов плазмы.

Список литературы

1. The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology / I. Adamovich [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55, No 373001. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ac5e1c#dac5e1cs11.
2. Electrical Model of Cold Atmospheric Plasma Gun / Ya. Z. Slutsker [et al.] // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24, No 10. https://doi.org/10.1063/1.4986023.
3. Надольский, А. Н. Теоретические основы радиотехники / А. Н. Надольский. Минск, 2005.
4. Туев, В. И. Проектирование радиоэлектронных средств по критериям нелинейности / В. И. Туев. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлект., 2020.

5. Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction Thereof with the Surface of Objects / Ma Tianbao [et al.] // Plasma Science and Technology. 2025. Vol. 27, No 1.
6. Способ диагностики плазмы диэлектрического барьерного разряда: Евраз. пат. 045560; МПК (2006) H05H 1/00 / А. Н. Осипов, Д. А. Котов; заявитель и патентообладатель Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек. № 202390454; заявл. 31.01.2023; опубл. 05.12.2023.
7. Устройство для измерения тока в высоковольтной цепи: Евраз. пат. 042096; МПК (2006) G01R 19/06 / А. Н. Осипов; заявитель и патентообладатель Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек. № 202291076; заявл. 28.03.2022; опубл. 13.01.2023.
8. Кривошеев, В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ) / В. И. Кривошеев. Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2006.

Поступила 05.02.2025 Принята в печать 04.03.2025

References

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., Baalrud S., Babaeva N., et al. (2022) The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 55 (373001). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ac5e1c#dac5e1cs11.
2. Slutsker Ya. Z., Semenov V. E., Krasik Ya. E., Ryzhkov M. A., Felsteiner J., Binenbaum Y., et al. (2017) Electrical Model of Cold Atmospheric Plasma Gun. *Physics of Plasmas*. 24 (10). https://doi.org/10.1063/1.4986023.
3. Nadolsky A. N. (2005) *Theoretical Foundations of Radiotechnics*. Minsk (in Russian).
4. Tuyev V. I. (2020) *Designing Radioelectronic Systems by Nonlinearity Criteria*. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (in Russian).
5. Tianbao Ma, Kalenkovich Ya., Rokach V., Osipov A. (2025) Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of Their Interaction with Object Surfaces. *Plasma Science and Technology*. 27 (1).
6. Osipov A. N., Kotov D. A. (2006) Method for Diagnosing Dielectric Barrier Discharge Plasma. *Eurasian Patent 045560, IPC, H05H 1/00, Applicant and Patent Holder Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. No 202390454; Declared 31.01.2023; Published 05.12.2023 (in Russian).
7. Osipov A. N. (2006) Device for Measuring Current in a High-Voltage Circuit. *Eurasian Patent 042096, IPC, G01R 19/06, Applicant and Patent Holder EI Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. No 202291076; Declared 28.03.2022; Published 13.01.2023 (in Russian).
8. Krivosheev V. I. (2006) *Modern Methods of Digital Signal Processing (Digital Spectral Analysis)*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky (in Russian).

Received: 5 February 2025 Accepted: 4 March 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. центра «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ма Т., асп. каф. электронной техники и технологий, БГУИР

Рокач В. А., асп. каф. электронной техники и технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A. N., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Sectoral Laboratory at the Center for "Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes", Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ma T., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technologies, BSUIR

Rokach V. A., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoliy Nikolayevich