

УДК 533.9.082

DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_2\\_59\\_43](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_43)

EDN: TFXMZH

## ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЮЩИХ ХОЛОДНУЮ ПЛАЗМУ, ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОБЪЕКТАМИ

А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач, Т. Ма

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск*

## CHANGING THE PARAMETERS OF SIGNALS EXCITING COLD PLASMA WHEN INTERACTING WITH OBJECTS

A.N. Osipov, Y.N. Kalenkovich, V.A. Rokach, T. Ma

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

**Аннотация.** Исследуются вопросы регистрации и обработки сигналов, возбуждающих плазму, а также контроля взаимодействия плазмы с поверхностью объектов на основе анализа ее энергетических характеристик. Предложено осуществлять оценку воздействия / взаимодействия холодной плазмы на / с объектами на основе измерения и анализа динамики изменений энергетических характеристик сигналов, возбуждающих плазму.

**Ключевые слова:** диагностика холодной низкотемпературной плазмы, сигналы генерации, выделяемая мощность на плазме.

**Для цитирования:** Изменение параметров сигналов, возбуждающих холодную плазму, при взаимодействии с объектами / А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач, Т. Ма // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 2 (59). – С. 43–47. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_2\\_59\\_43](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_43). – EDN: TFXMZH

**Abstract.** This article studies the issues of recording and processing of the signals that excite plasma, as well as the control of plasma interaction with the surface of objects on the basis of the analysis of its energy characteristics. The article offers assessment of influence/interaction of cold plasma on / with objects on the basis of the measurement and analysis of dynamics of changes of energy characteristics of the signals that excite plasma.

**Keywords:** diagnostics of cold low-temperature plasma, lasing signals, released power on plasma.

**For citation:** *Changing the parameters of signals exciting cold plasma when interacting with objects* / A.N. Osipov, Y.N. Kalenkovich, V.A. Rokach, T. Ma // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 2 (59). – P. 43–47. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_2\\_59\\_43](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_43) (in Russian). – EDN: TFXMZH

### Введение

Характер взаимодействия различных физических факторов (электромагнитного излучения, теплового излучения, низкотемпературной атмосферной плазмы и др.) с биологическими объектами определяется как параметрами излучения, так и физическими свойствами среды биологического объекта. При взаимодействии различного рода излучений с биологическими объектами лишь часть энергии поглощается. Это взаимодействие носит биофизический характер, т.е. происходит процесс поглощения энергии на уровне биотканей целого организма. Действие излучений на живые организмы обусловлено, в первую очередь, той частью энергии, которая передается, поступает внутрь объекта и поглощается биологическими тканями. Установление количественной взаимозависимости внешнего излучения и характером поглощения энергии в биологическом объекте играет ключевую роль в оценке и интерпретации наблюдаемых биологических эффектов [1].

Расширяется спектр применений низкотемпературной атмосферной плазмы в здравоохранении. Однако широкое применение технологий низкотемпературной атмосферной плазмы сдерживается отсутствием простых методов контроля ее взаимодействия с объектами, включая биообъекты [2], [3]. В работе [4] предложено оценку взаимодействия холодной плазмы на / с объектами осуществлять на основе измерения и анализа динамики изменений энергетических характеристик сигналов, возбуждающих плазму. В данной статье исследуются вопросы регистрации и обработки сигналов, возбуждающих плазму, оценке взаимодействия плазмы на основе анализа ее энергетических характеристик.

### 1 Методика проведения эксперимента

Методика оценки взаимодействия плазмы с биообъектом основана на измерении и анализе параметров сигналов, возбуждающих плазму (мгновенных значений напряжения и токов), при воздействии плазмы на биообъект. Плазма является высоковольтной нагрузкой для генератора,

сопротивление которой меняется при взаимодействии с объектами. Для оценки динамики изменения нагрузки в данной статье используется параметр мощности, выделяемой на нагрузке. Соответственно, в качестве характеристики плазмы и ее взаимодействия с объектом может быть использовано изменение мощности (полной, активной и реактивной), выделяемой на ней.

Для изучения взаимодействия с объектами и диагностики состояния плазмы разработан исследовательский стенд контроля мощности, выделяемой в нагрузке генератора.

Структурная схема исследовательского стенда на рисунке 1.1 содержит генератор импульсов, формирователь сигнала, повышающий трансформатор, датчик напряжения, первый и второй датчики тока, разрядный блок с электродами, аналогово-цифровой преобразователь сигналов, система подачи газа, вычислительное устройство. Сигнал с выхода генератора импульсов поступает на формирователь сигнала на основе обратного импульсного преобразователя, который формирует сигнал для зажигания атмосферной плазмы. Далее сигнал поступает через повышающий трансформатор на первый и второй электроды разрядного блока. Значения напряжения сигнала во вторичной обмотке повышающего трансформатора, считанные с датчика напряжения, поступают на аналогово-цифровой преобразователь. Для регистрации амплитуды тока в выходной высоковольтной цепи использовано устройство измерения на основе оптопары

[5]. Преимуществами данного устройства являются высокое быстродействие, линейность ВАХ, электрическая изоляция между высоковольтной частью и измерительной цепью. Сигналы токов, протекающие через первый и второй электроды разрядного блока, считываются с первого и второго датчиков тока поступают на аналогово-цифровой преобразователь и регистрируются вычислительным устройством для дальнейшей обработки результатов. В вычислительном устройстве регистрировались также значения напряжения в выходной цепи. Поступившие в вычислительное устройство электрические зависимости мгновенных значений и токов содержат информации о процессе взаимодействия плазмы с объектом. Анализ взаимодействия плазмы и объекта основан на изменении мгновенной мощности, поступающей в плазму, вычисленной посредством регистрируемых мгновенных значений токов и напряжений.

Традиционно для генерации плазмы используется синусоидальные сигналы. В работе [6] для этих целей предложено использовать сигналы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В этом случае на разрядный блок подаются сигналы прямоугольной формы с различной скважностью, при этом во вторичной цепи формируются затухающие сигналы синусоидальной формы. Выбор параметров и частоты сигналов, возбуждающих плазму, с учетом резонансных свойств выходного контура позволяет уменьшить энергопотребление генератора.

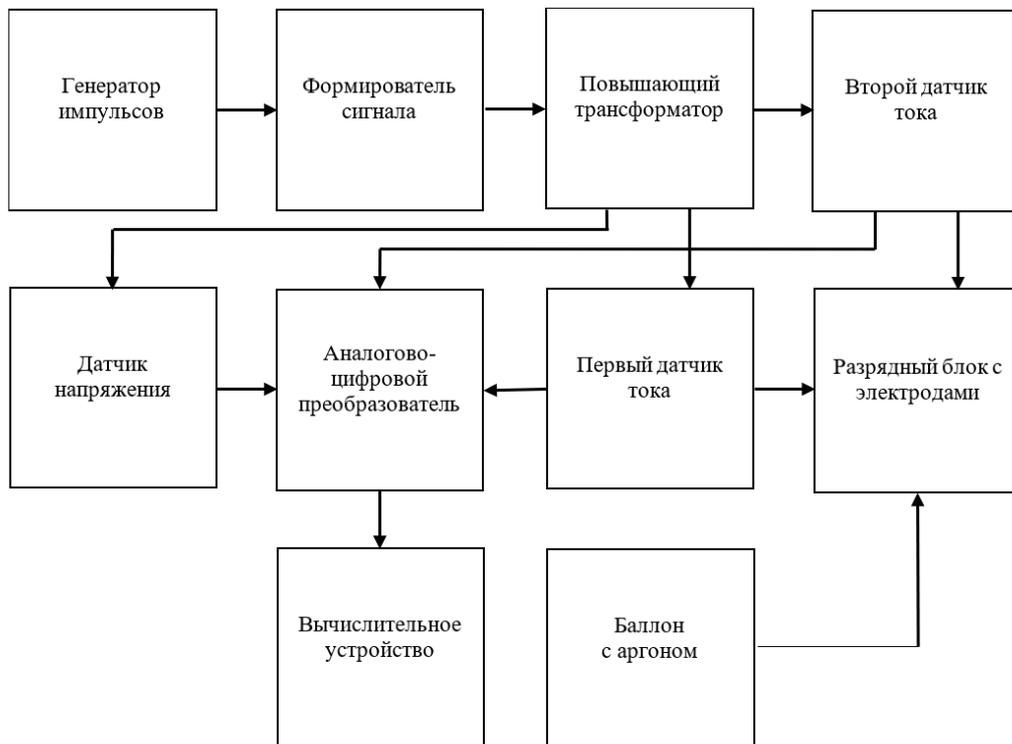


Рисунок 1.1 – Структурная схема исследовательского стенда

В связи с этим в данных исследованиях также применены сигналы с ШИМ. На рисунке 1.2, *a* представлен сигнал с ШИМ на выходе генератора импульсов с коэффициентом заполнения  $D = 12,5\%$ , которые вызывают затухающие колебания (рисунок 1.2, *б*) во вторичной цепи (на электродах разрядной системы).

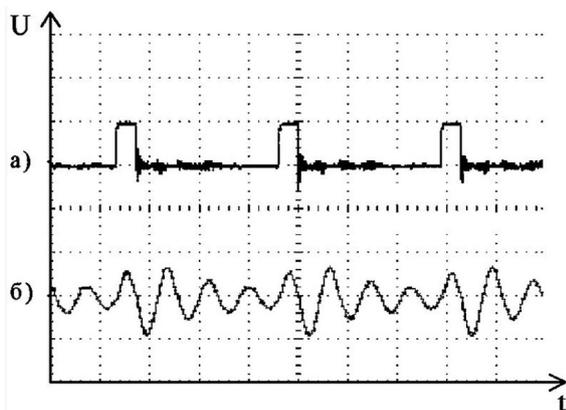


Рисунок 1.2 – Форма задающего сигнала *a*) в первичной обмотке повышающего трансформатора и форма сигнала, *б*) на электродах разрядного блока

В проводимых исследованиях частота дискретизации регистрируемых мгновенных значений токов и напряжений составляла  $f_d = 5,0225\text{МГц}$ , а частота задающего сигнала на выходе генератора импульсов –  $f_g = 12,25\text{кГц}$ , коэффициент заполнения  $D = 12,5\%$ . Максимальная длина обрабатываемых последовательностей –  $N = 4000$  отсчетов или  $T_0 = N / f_d = 0,79\text{мс}$ .

## 2 Обработка результатов исследований

Для обработки результатов измеренных мгновенных значений напряжений и тока в выходной цепи генератора плазмы и оценке ее взаимодействия с объектами разработана программа в среде Matlab. Программа работает следующим образом. Мгновенные значения напряжения  $U(n)$  и тока  $I(n)$  (рисунок 2.1, *a*, *б*)

сохраняются в вычислительном устройстве, где  $n$  – номер отсчета, пропорциональный времени  $t$ . Амплитудные значения напряжения и тока указаны в относительных единицах.

В исследуемой последовательности укладывается 9 исследуемых (повторяющихся) периодов сигналов. Однако, ввиду нестабильности частоты генератора импульсов, количество полных периодов может в регистрируемой последовательности оказаться меньше на единицу –  $M = 8$ . Соответственно, частота дискретизации сигналов определяет длительность обрабатываемого сигнала  $T_0$ , а также количество обрабатываемых периодов сигнала возбуждения плазмы

$$M = \lfloor N f_g / f_d - 1 \rfloor.$$

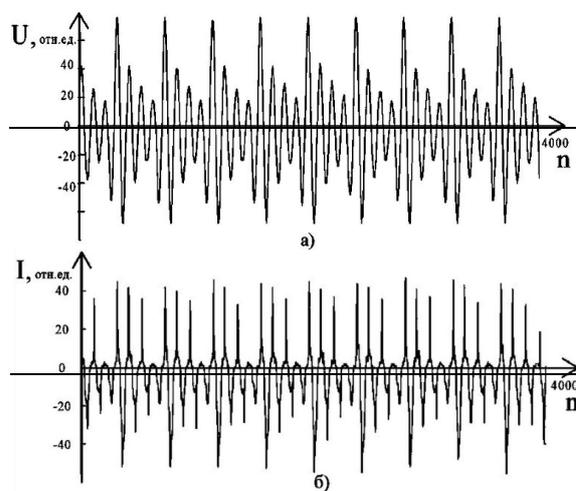


Рисунок 2.1 – Зависимости регистрируемых мгновенных значений напряжения  $U(n)$  *a*) и мгновенных значений тока  $I(n)$  *б*)

Далее производятся вычисления мгновенной электрической мощности в соответствии с известным выражением [7]. График зависимости изменения мгновенной мощности для сигналов, представленных на рисунке 2.1, приведен на рисунке 2.2.

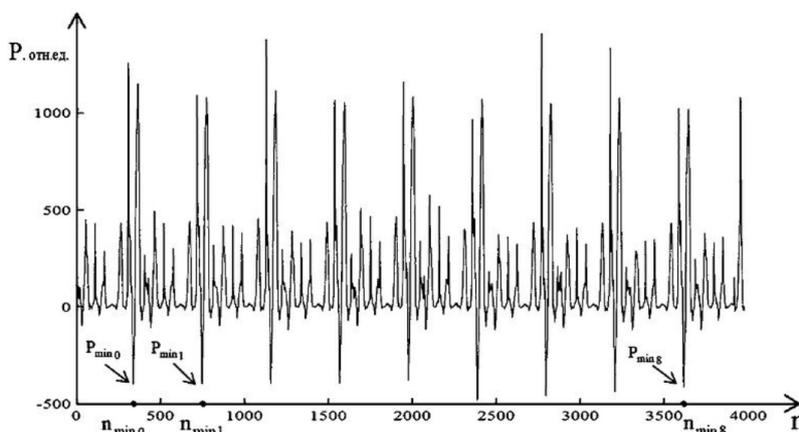


Рисунок 2.2 – Зависимости изменения мгновенной электрической мощности  $P(n)$

Как следует из рисунков 2.1 и 2.2, обрабатываемые последовательности содержат 8 полных повторяющихся периодов. Выделение анализируемых периодов исследуемых последовательностей выполняется на основе поиска локальных экстремумов. Для дальнейшей обработки в программе могут быть использованы зависимости мгновенных напряжений  $U(n)$ , тока  $I(n)$ , мощностей  $P(n)$ . Однако более четко отрицательные экстремумы  $P_{\min i}$  и соответствующие им отсчеты времени  $n_{\min i}$  характерны для зависимости  $P(n)$ , где  $i = 0 \div M$  – порядковый номер локального экстремума, начиная с нулевого. Первый полный период начинается с отсчета времени  $n_{\min 0}$  и соответствует локальному отрицательному экстремуму  $P_{\min 0}$ , а последний заканчивается в момент времени  $n_{\min 8}$ , определяющий местоположение  $P_{\min 8}$ .

Алгоритм выделения экстремумов на основе анализа зависимости изменения мгновенной мощности реализован следующим образом.

На отрезке, начиная с нулевого значения от  $n_0$  до  $n_0 + \Delta n$ , осуществляется поиск минимального значения  $P_{\min 0}$  первого локального экстремума и соответствующего ему отсчета времени  $n_{\min 0}$ . Интервал поиска  $\Delta n$  определяется из выражения:

$$\Delta n = \left( \frac{1}{f_g} + \frac{\Delta f}{f_g^2} \right) f_d, \quad (2.1)$$

где  $\frac{\Delta f}{f_g}$  – относительная нестабильность частоты задающего генератора,  $\Delta f$  – величина ухода частоты.

Таким образом определяется значение  $n_{\min 0}$ , соответствующее экстремуму  $P_{\min 0}$ . Далее выполняется поиск следующего локального экстремума анализируемой зависимости  $P_{\min 1}$ ,  $n_{\min 1}$ , соответствующий локальному экстремуму на интервале от  $n_{\min 1}$  до  $n_{\min 1} + \Delta n$ .

Процедура поиска локальных экстремумов  $P_{\min i}$  и их местоположения  $n_{\min i}$  повторяется на

отрезках времени соответственно от  $n_{\min i-1}$  до  $n_{\min i-1} + \Delta n$ .

Таким образом для дальнейшей обработки формируются интервалы:  $n_{\min 0} \div n_{\min 1}$ ,  $n_{\min 1} \div n_{\min 2}$  ...  $n_{\min i-1} \div n_{\min i}$ . Для выделенных интервалов рассчитываются энергетические параметры – активная, реактивная и полная электрические мощности:

$$P_i = \frac{1}{n_{\min i} - n_{\min i-1}} \sum_{n_{\min i-1}}^{n_{\min i}} U(n)I(n), \quad (2.2)$$

при  $U(n)I(n) \geq 0$ ,

$$Q_i = \frac{1}{n_{\min i} - n_{\min i-1}} \sum_{n_{\min i-1}}^{n_{\min i}} U(n)I(n), \quad (2.3)$$

при  $U(n)I(n) < 0$ ,

$$S_i = \frac{1}{n_{\min i} - n_{\min i-1}} \sum_{n_{\min i-1}}^{n_{\min i}} \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}. \quad (2.4)$$

### 3 Результаты исследований

В соответствии с полученными значениями строятся зависимости  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $S_i$ . На рисунке 3.1 приведены зависимости изменения полной мощности, выделяемой на нагрузке при изменении расстояния от факела плазмы до объекта. В качестве объекта использовалась пластина из пластика. На рисунке 3.2 приведены зависимости изменения полной, реактивной и активной мощности при взаимодействии с различными объектами.

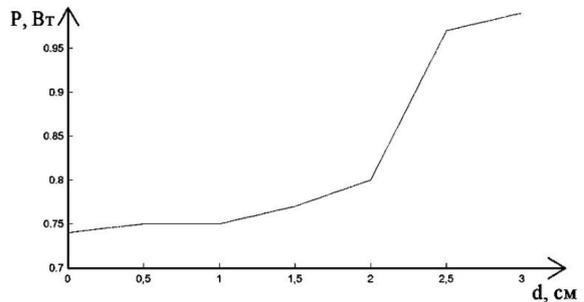


Рисунок 3.1 – Зависимость изменения полной мощности от расстояния до объекта

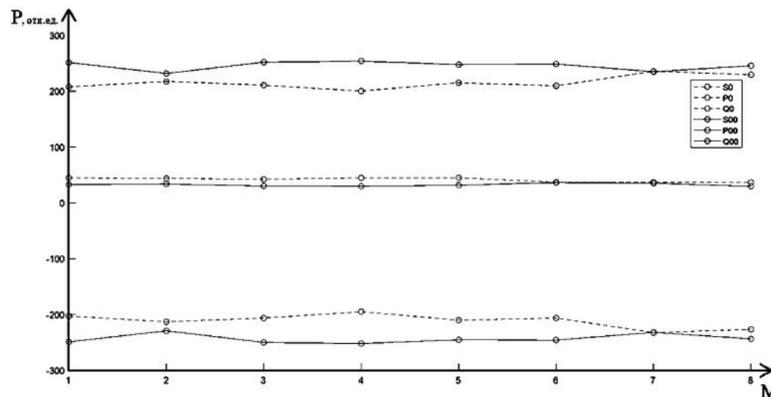


Рисунок 3.2 – Зависимости изменения активной  $P_0$ , реактивной  $Q_0$ , полной  $S_0$  мощностей сигналов, генерирующих плазму при её взаимодействии с кюветой физического раствора,  $P_{00}$ ,  $Q_{00}$ ,  $S_{00}$  – при взаимодействии с кюветой человеческой плазмой

В качестве объектов были использованы кюветы с различным наполнением (физраствором и человеческой плазмой). Как следует из представленных рисунков при взаимодействии плазмы с объектами изменяется энергетические характеристики сигналов, генерирующих плазму. Средние значения активной, реактивной и полной мощности в относительных единицах за рассматриваемый период соответственно составили: при взаимодействии с кюветой с физраствором  $S_{00} = 243,87$ ,  $P_{00} = 32,35$ ,  $Q_{00} = -243,477$ , при взаимодействии с кюветой с человеческой плазмой –  $S_0 = 215,63$ ,  $P_0 = 40,97$ ,  $Q_0 = -211,613$ . Таким образом, изменения энергетических параметров характерны при изменении типов объектов (материала, из которого изготовлен объект, формы объекта и т. д.), а также расстояния до объекта.

#### Заключение и выводы

В данной статье рассмотрены вопросы оценки изменения параметров сигнала в высоковольтной цепи генератора при взаимодействии плазмы с объектами. Для проведения исследования разработан программно-аппаратный комплекс, регистрирующий значения мгновенных токов и напряжений на электродах разрядного блока генератора плазмы. Разработана программа для обработки полученных данных и оценки взаимодействия плазмы с объектами. В результате исследования установлено, что при взаимодействии плазмы с объектами изменяются энергетические характеристики плазмы, а именно полная, активная и реактивная мощности. Установлено, что характеристики активной и реактивной мощности имеют выраженные отличия при изменении расстояния до объекта, а также изменении материала объекта. Данные исследования могут быть использованы для разработки новых методов контроля взаимодействия низкотемпературной атмосферной плазмы с биообъектами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, А.А. Биофизика ионизирующих и неионизирующих излучений / А.А. Кузнецов // Биофизика ионизирующих и неионизирующих излучений. – 2016. – С. 21.
2. Th. Von Woedtke. Plasmas for medicine / Th. Von Woedtke, H.-R. Metelmann // Contrib. Plasma Phys. – K.D. – UK: Physics Reports 530. – 2013. – P. 291–320.
3. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology / B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott [et. al.] // UK: Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – P. 2–56.
4. Применение сигналов с ШИМ для генерации низкотемпературной атмосферной плазмы / А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач, Т. Ма // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 32–38.
5. Устройство для измерения тока в высоковольтной цепи: пат. 042096 ЕАПВ / А.Н. Осипов; дата публ.: 13.01.2023.
6. Осипов, А.Н. Энергоэффективное устройство генерации низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении / А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач // Научно-практический журнал: Новости науки и технологий. – 2022. – № 2 (61). – С. 27–32.
7. Электротехника и электроника / Ю.В. Бладыко [и др.] // Электротехника и электроника. – 2009. – С. 7.

Поступила в редакцию 12.04.2024.

#### Информация об авторах

Осипов Анатолий Николаевич – к.т.н, доцент  
Каленкович Евгений Николаевич – ст. преподаватель  
Рокач Валерий Александрович – аспирант  
Ма Тяньбао – аспирант