

УДК 629.7.036

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ

© 2023 г. А. П. Плохих¹, *, Н. А. Важенин¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института, Москва, Россия

*riame@mai.ru

Поступила в редакцию 28.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 06.04.2023 г.

Описана процедура экспериментального определения статистических характеристик собственного электромагнитного излучения лабораторного макета стационарного плазменного двигателя СПД-70 разработки Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института. Исследовались временные комплексные реализации процессов излучения СПД-70 при длительности выборки 1 мс и полосе анализа 140 МГц для характерных центральных частот 0,9, 1,050, 1,200, 1,350 ГГц (мощность разряда 600 Вт, горизонтальная поляризация) при работе на различных рабочих телах. Проведенные исследования позволили получить оценки статистических характеристик излучения СПД-70 для перспективных рабочих тел. К новым результатам следует отнести, что полученные законы распределения для синфазной и квадратурной компоненты комплексной огибающей процесса излучения существенно отличаются от гауссовского. Что касается распределения амплитудной огибающей процесса, то в общем случае имеет место отличие от рэлеевского закона распределения. При переходе с ксенона на криптон степень негауссовости и отличие от рэлеевского закона увеличиваются. При этом закон распределения фазы комплексной огибающей процесса близок к равномерному и инвариантен к типу рабочего тела.

DOI: 10.31857/S0023420623700176, EDN: XTDOMT

ВВЕДЕНИЕ

Общая проблема обеспечения безопасности космических полетов напрямую связана с решением задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на борту космических аппаратов (КА) со стационарными плазменными двигателями (СПД). Это особенно актуально в связи с тенденцией перехода на более дешевые и доступные рабочие тела с целью снижения затрат на эксплуатацию КА. Такая замена газообразного рабочего вещества в СПД существенно меняет рабочие процессы в двигателе и требует их дополнительной оптимизации [1, 2]. В этой связи возникает вопрос о степени влияния рабочих веществ на электромагнитную обстановку, создаваемую стационарными плазменными двигателями.

Данная задача рассматривалась в работе [3], где была проведена экспериментальная оценка влияния рабочих веществ на электромагнитную обстановку, создаваемую стационарными плазменными двигателями при работе на ксеноне и криптона. Было показано, что перевод СПД-70 с ксенона на криптон существенно повышает его

уровень излучения в диапазоне частот 1...2 ГГц. При этом максимальное превышение уровня излучения для криптона может составлять порядка 10 дБ для горизонтальной поляризации.

Таким образом, смена рабочего вещества существенно меняет электромагнитную обстановку, создаваемую стационарным плазменным двигателем (для одинаковой мощности разряда), что требует проведения дополнительных мероприятий по обеспечению ЭМС с целью сохранения функциональной безопасности КА.

Вопросы обеспечения ЭМС плотно сопрягаются с классическими задачами обеспечения помехоустойчивости систем космической связи. Наличие широкополосного собственного излучения СПД в радиодиапазоне дополнительно понижает отношение сигнал/шум на входе приемных трактов бортовых радиосистем КА. При определенных условиях это может существенно ограничить энергетический потенциал и характеристики помехоустойчивости радиолиний при связи с КА, оборудованными плазменными двигателями. При этом количественные оценки помехоустойчивости могут быть получены в рамках

классической радиотехники с применением методов теории связи, что требует разработки и верификации математических моделей помехового излучения СПД.

С точки зрения математического описания собственного электромагнитного излучения плазменных двигателей возможны два основных подхода: электродинамический и феноменологический [4]. Электродинамический подход основывается на разработке математических моделей процессов генерации электромагнитного излучения, базирующихся на фундаментальных законах плазменной электродинамики. Феноменологический подход, не углубляясь в тонкую физическую природу генерации электромагнитного излучения плазмы, базируясь в основном на результатах экспериментальных исследований, формирует некоторые эквивалентные математические модели такого излучения, удобные с точки зрения использования в инженерной практике. Упомянутые два подхода не противоречат, а эффективно дополняют друг друга. Электродинамические модели чрезвычайно важны с точки зрения понимания физической природы и закономерностей формирования электромагнитного излучения плазмы, но, как правило, представляются весьма сложными для использования при оценке помехоустойчивости космических систем связи. В то же время феноменологические модели, не претендуя на детальное раскрытие физических механизмов формирования излучения плазменного двигателя, позволяют эффективно решать конкретные инженерные задачи проектирования бортовых радиосистем КА, такие, например, как оценка электромагнитной совместимости СПД и бортовых радиосистем, оценка помехоустойчивости, дальности действия, скорости передачи информации в условиях функционирования плазменного двигателя. Разработка феноменологических моделей, как правило, осуществляется как на основе результатов экспериментальных исследований, так и с использованием данных, полученных в рамках электродинамического подхода.

Для разработки эквивалентных математических моделей необходимо знать статистические характеристики и тонкую спектрально-временную структуру излучения СПД при работе на различных рабочих телах. Решению этих задач посвящена данная статья.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований рассматривалась модель стационарного плазменного двигателя СПД-70 с внешним диаметром ускорительного канала 70 мм. Подробное описание конструкции дано в публикации [3]. В данной модели геометрия ускорительного канала и топо-



Рис. 1. Модель двигателя СПД-70.

логия магнитного поля на срезе двигателя были оптимизированы для работы на криптоне [1]. Внешний вид стационарного плазменного двигателя представлен на рис. 1.

Для измерения помехоэмиссии СПД использовалась установка, подробно описанная в исследованиях [3, 5, 6]. Ее основу составляла мобильная безэховая экранированная камера (БЭК), в которой устанавливался тонкостенный диэлектрический вакуумный отсек, соединенный с основной вакуумной камерой, образующий общий откачиваемый вакуумный объем. Внутри диэлектрического отсека устанавливалась модель двигателя СПД-70. Испытания модели двигателя СПД-70 проводились для трех уровней мощности разряда — 600, 800 и 1000 Вт при напряжении разряда 300 В и работе на ксеноне и криптоне.

Возникающее при работе плазменного двигателя излучение через стенки диэлектрического отсека с известным затуханием поступало на измерительные антенны, размещенные внутри БЭК.

Применяемые измерительные средства аналогичны описанным в работах [3, 6]. Использовалась рупорная измерительная антенна с рабочим диапазоном частот от 0.9 до 12.4 ГГц и линейной поляризацией. Угловое положение антенны составляло $(90 \pm 5)^\circ$ относительно направления плазменной струи двигателя. Выход антенны подключался к анализатору спектра.

При анализе временных характеристик излучения СПД анализатор спектра работал в режиме реального времени на фиксированных частотах и оцифровывал квадратурные составляющие входного процесса в полосе анализа 140 МГц. С помощью перестройки центральной частоты анализатора спектра были получены временные реализации амплитудной огибающей процесса на заданных участках исследуемого диапазона частот, которые были

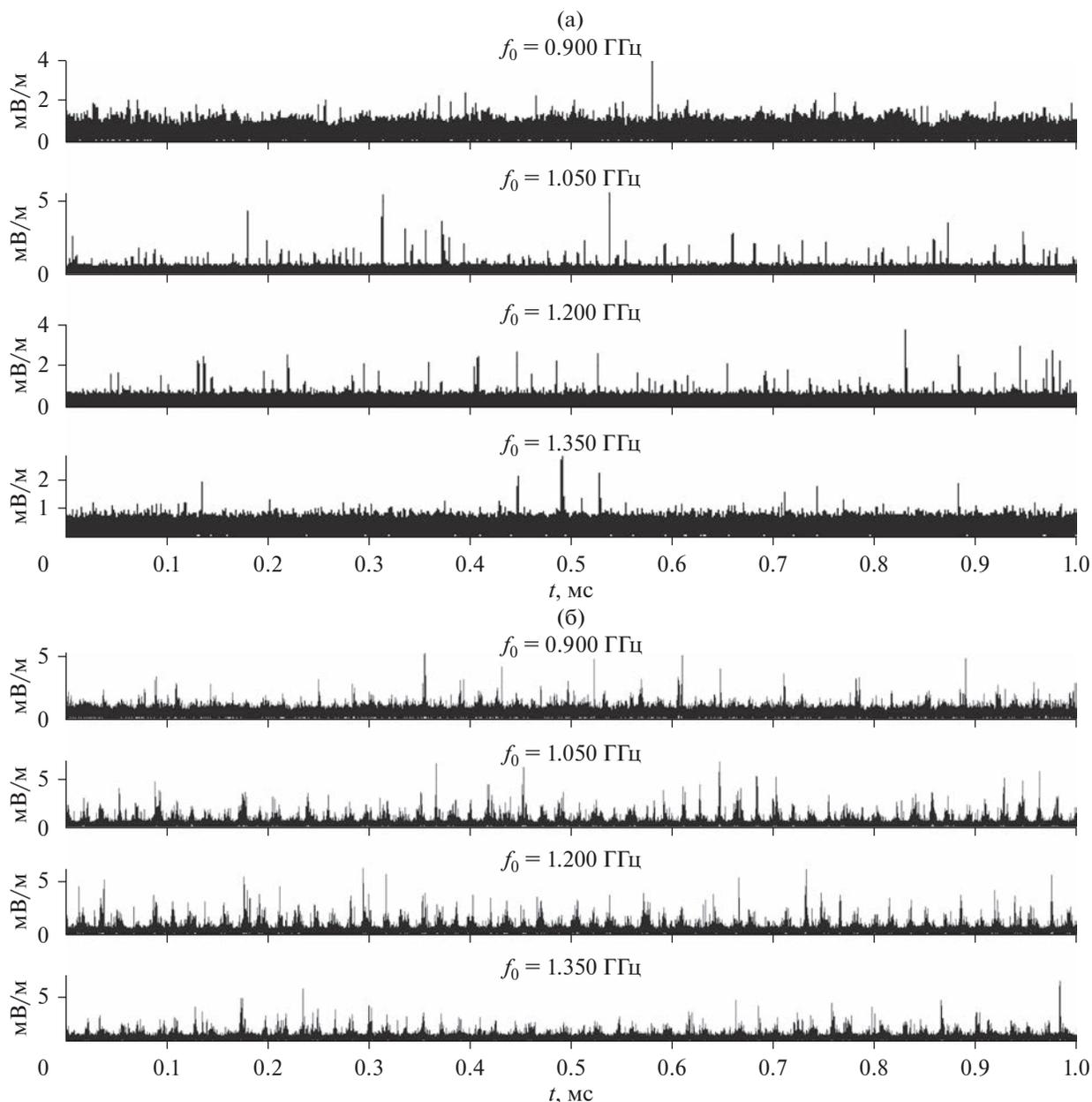


Рис. 2. Временные реализации амплитудной огибающей излучения СПД-70: а – ксенон, мощность разряда 600 Вт, горизонтальная поляризация; б – криптон, мощность разряда 600 Вт, горизонтальная поляризация.

пересчитаны в напряженность электрического поля в апертуре измерительной антенны.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе работ исследовались временные комплексные реализации процессов излучения на типовых частотах при работе СПД-70 на различных рабочих телах. Примеры реализаций при длительности выборки 1 мс и полосе оцифровки 140 МГц приведены на рис. 2 для характерных центральных частот 0.9, 1.050, 1.200 и 1.350 ГГц.

Представленные реализации соответствуют мощности разряда 600 Вт и горизонтальной поляризации, при которых рассматриваемые эффекты выражены наиболее ярко.

Анализ полученных временных реализаций амплитудной огибающей показывает, что при работе на ксеноне и криптоне они представляют собой случайные последовательности импульсов, длительность и интервал следования которых зависят от частотных поддиапазонов и видов рабочих веществ, что качественно подтвердили результаты, полученные в работах [3,

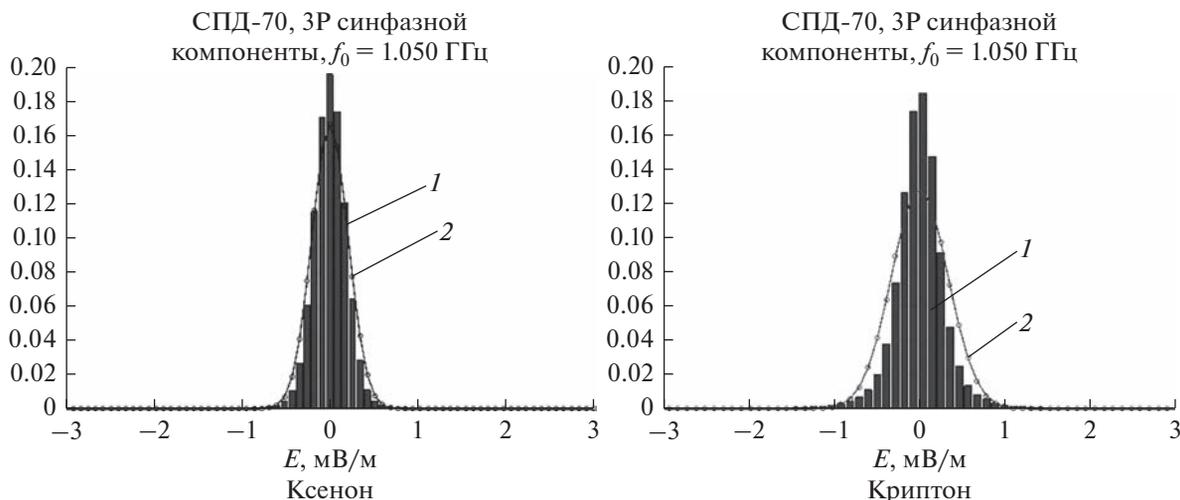


Рис. 3. Гистограмма распределения синфазной составляющей: 1 – эксперимент; 2 – теория. Мощность разряда 600 Вт.

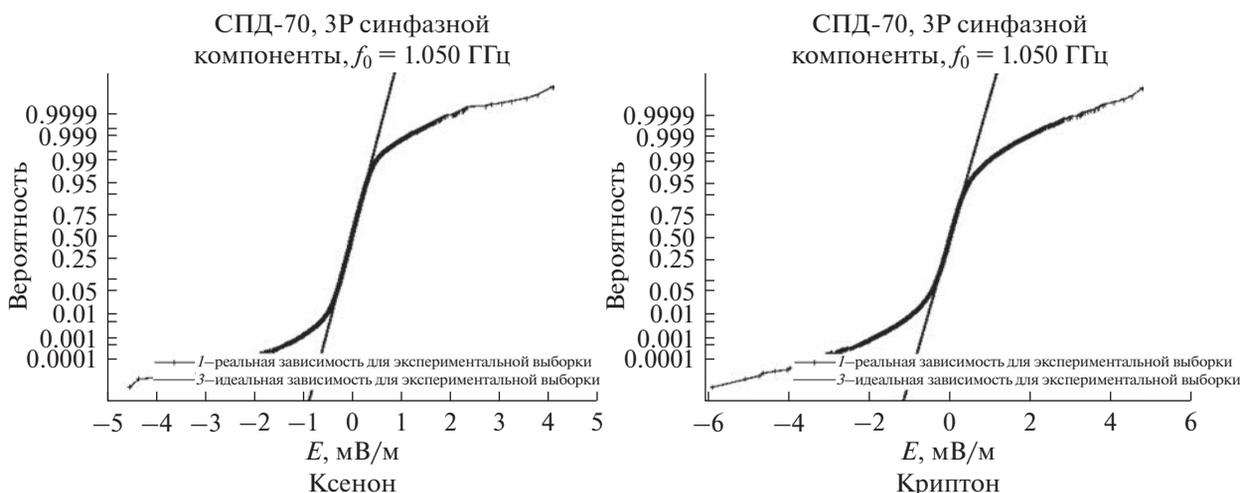


Рис. 4. Закон распределения синфазной компоненты на вероятностной бумаге: 1 – закон распределения экспериментальной выборки; 3 – гауссовый закон распределения. Мощность разряда 600 Вт.

7–9]. При этом на фоне последовательности случайных импульсов возникают квазипериодические группы импульсов увеличенной (более чем в два раза) амплитуды, образующие ярко выраженные “пачки”. Так, например, при использовании ксенона (режим 600 Вт, частота 1.05 ГГц, горизонтальная поляризация) средний интервал следования одиночных импульсов лежит в диапазоне 1...5 мкс, а интервал следования “пачек” составляет 6...10 мкс. Для криптона заметна более упорядоченная периодичность “пачек” с увеличенной по отношению к ксенону длительностью. При этом средний период повторения импульсов “пачки” для криптона лежит в диапазоне 16...20 мкс при средней длительности “пачки” равной примерно полупериоду их следования (8...10 мкс).

Способность спектроанализатора представлять оцифрованные значения в виде квадратурных

составляющих процесса была использована для проведения анализа закона распределения (ЗР) квадратурных реализаций, имеющих выраженные импульсные компоненты. На рис. 3 приведены гистограммы распределения синфазной составляющей принятого сигнала, на которую наложен идеальный гауссовский закон распределения, соответствующий параметрам реализации. На рис. 4 для тех же условий представлен интегральный закон распределения соответствующих реализаций на “вероятностной бумаге”, позволяющей визуальную оценку степени близости закона распределения конкретной реализации к гауссовскому с математическим ожиданием и дисперсией такими же, как и у экспериментально полученной реализации. Гауссовский закон распределения в этом случае отображается наклонной прямой. Из результатов видно, что для синфазных компонент ком-

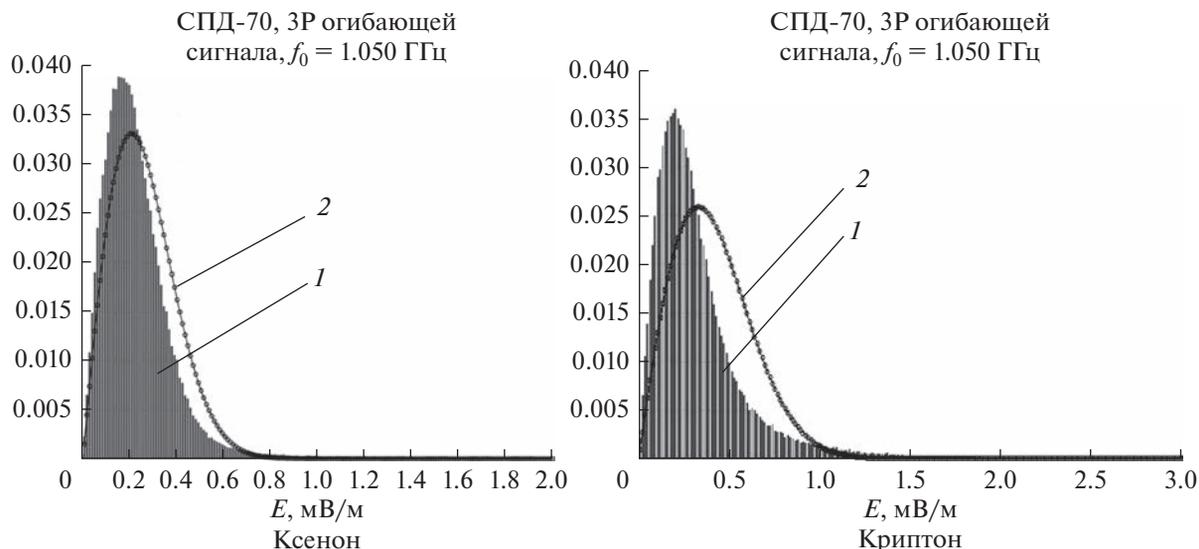


Рис. 5. Гистограмма распределения амплитудной огибающей: 1 – эксперимент; 2 – теория. Мощность разряда 600 Вт.

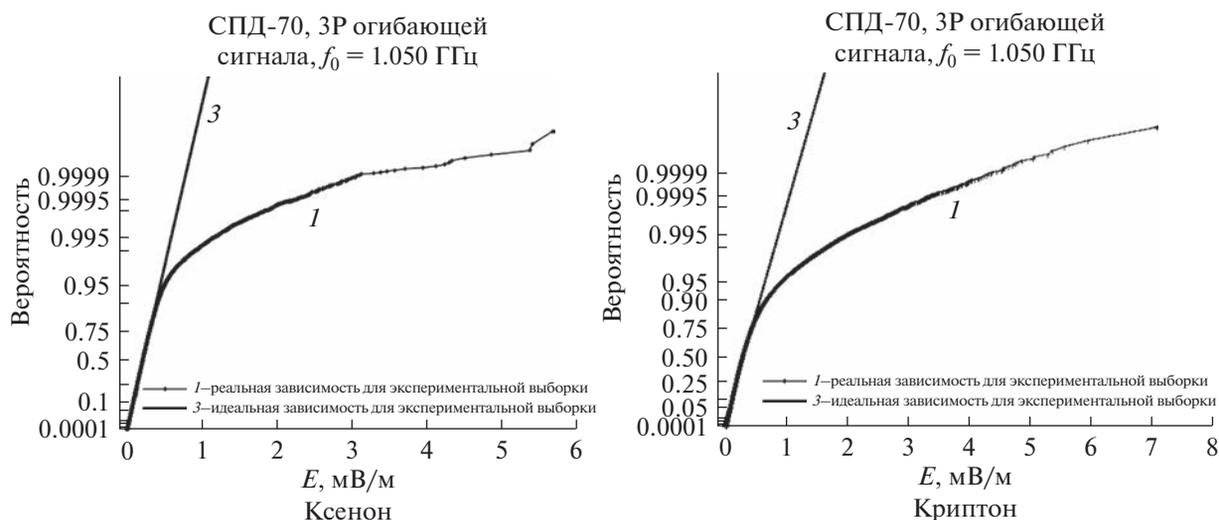


Рис. 6. Закон распределения амплитудной огибающей на вероятностной бумаге: 1 – закон распределения экспериментальной выборки; 3 – закон распределения Рэлея. Мощность разряда 600 Вт.

плексной огибающей процессов излучения при использовании ксенона и криптона, их дифференциальные (рис. 3) и интегральные (рис. 4) законы распределения существенно отличаются от гауссовского. Причем степень расхождения законов распределения для криптона начинается при существенно меньших амплитудах, чем для ксенона. Аналогичные результаты были получены и для квадратурной компоненты излучения СПД-70.

Результаты исследований для амплитудных огибающих процессов для ксенона и криптона представлены на рис. 5, 6. На графиках хорошо видно отличие от рэлеевского закона распределе-

ния. Причем в случае криптона это отличие более существенно.

Что касается фазовых статистических характеристик процессов, то для выбранных рабочих тел законы распределения фазы комплексной огибающей близки к равномерному (рис. 7).

При изучении внутриимпульсной структуры реализаций большой интерес представляют спектрально-временные характеристики групп импульсов, которые формируют “пачечную” структуру. Для анализа на рис. 8 представлены одиночные “пачки” импульсов для ксенона и криптона. Как видно из графиков, для ксенона

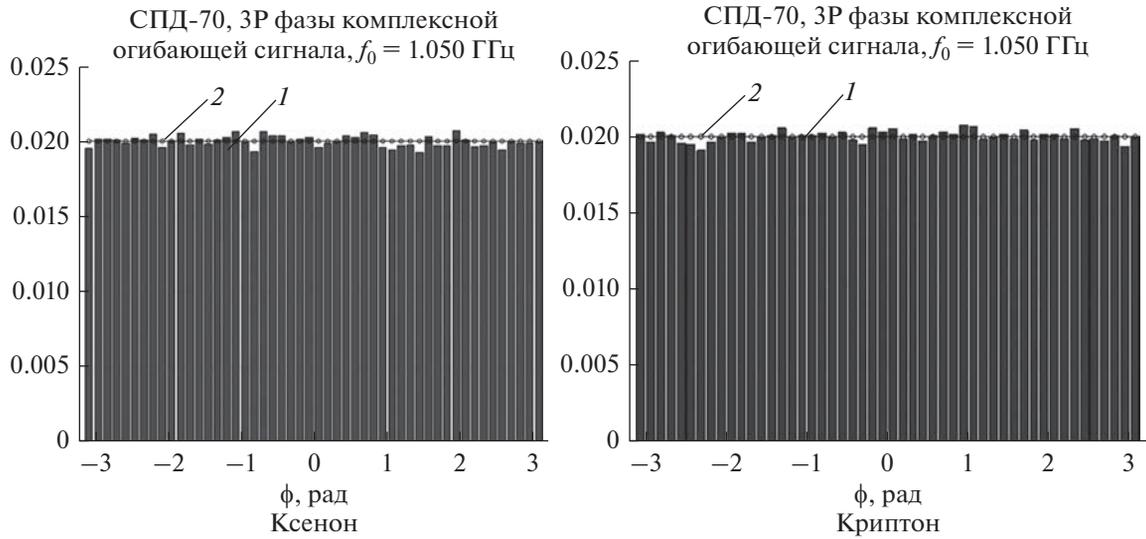


Рис. 7. Закон распределения фазы процесса: 1 – эксперимент; 2 – теория. Мощность разряда 600 Вт.

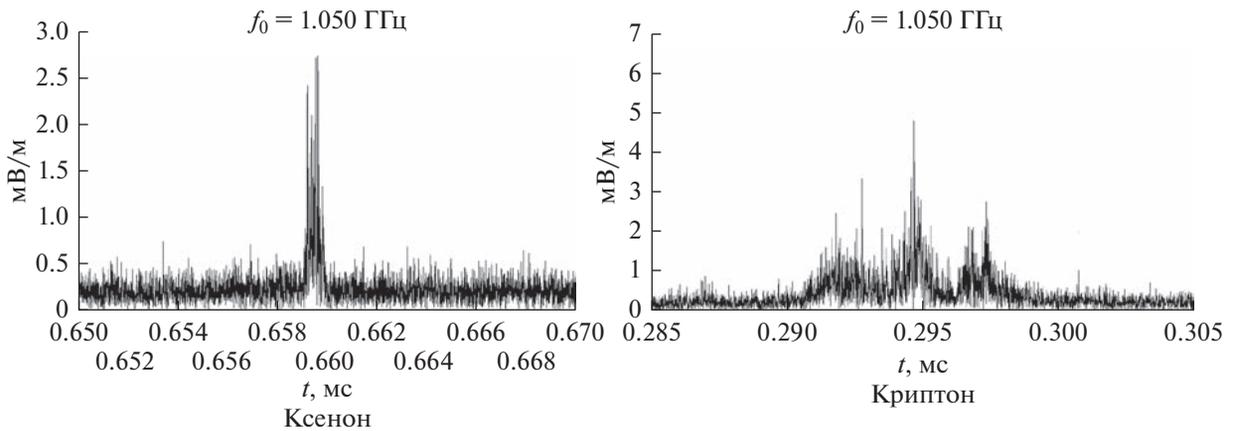


Рис. 8. Импульсы “пачек” излучения СПД-70. $f_0 = 1.050$ ГГц, мощность разряда 600 Вт.

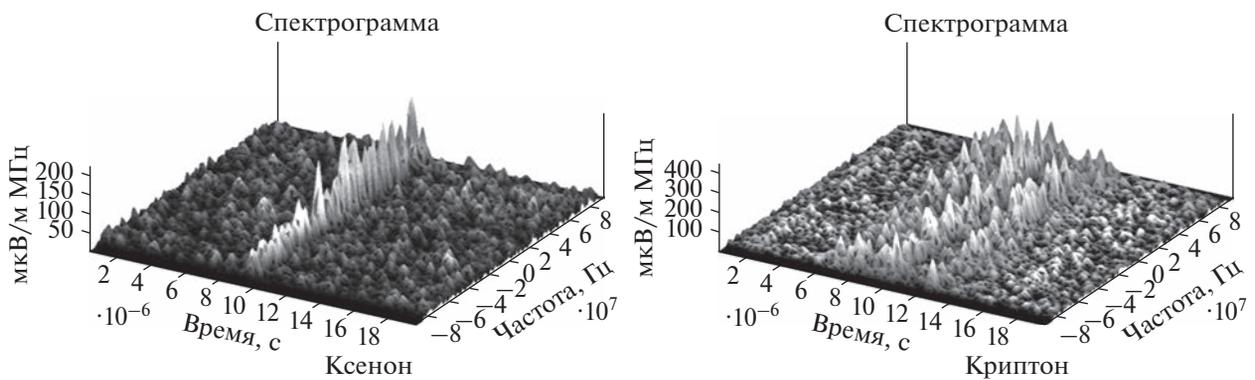


Рис. 9. Спектрограммы импульсов “пачек” излучения СПД-70. $f_0 = 1.050$ ГГц, мощность разряда 600 Вт.

длительность по уровню 0.5 составляет порядка 0.7 мкс, а для криптона – порядка 6 мкс.

Для реализаций (рис. 8) были построены спектрограммы, представленные на рис. 9.

Анализ рис. 9 показывает, что полученные спектрограммы соответствуют широкополосным шумоподобным импульсным процессам, которые в пределах полосы анализа спектроанализатора (140 МГц) в среднем имеют практически равномерный спектральный уровень. Такие результаты свидетельствуют, что оцифрованные выборки, следующие с интервалом 5 нс и определяющие структуру импульсов, практически не коррелированы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для обсуждения результатов предварительно рассмотрим сравнительные характеристики ксенона и криптона. Ксенон имеет высокую атомную массу – 131 а.е.м. – и относительно низкий потенциал ионизации – 12.1 эВ. Криптон имеет меньшую атомарную массу – 83.8 а.е.м., но более высокий потенциал ионизации – 14.0 эВ. Указанные различия приведут к тому, что при прочих равных условиях скорость атомов криптона в разрядном канале СПД будет выше, концентрация соответственно ниже, что приведет к увеличению длины их свободного пробега, снижению эффективности ионизации и, как следствие, уменьшению “ионной” составляющей разрядного тока. Учитывая, что сравнение результатов при использовании ксенона и криптона проводилось для одинаковых мощностей разряда, уменьшение величины “ионной” компоненты разрядного тока соответственно приводит к увеличению “электронной” компоненты. Учитывая, что процессы возбуждения, ионизации и релаксации атомов рабочего тела в СПД напрямую определяются “электронной” компонентой, можно ожидать, что изменение ее параметров будет существенно влиять на характеристики возникающего электромагнитного излучения, что и подтверждают проведенные эксперименты.

Что касается некоррелированности отсчетов в пределах импульсов, то это похоже на проявление эффектов дробового шума, который возникает, когда носители заряда пересекают некоторый потенциальный барьер. При этом каждый носитель генерирует в цепи импульс тока, а суперпозиция таких импульсов образует суммарный флуктуирующий ток. При работе стационарного плазменного двигателя такие эффекты могут возникнуть при вводе пучка электронов катода-компенсатора в плазменную струю и сопровождаться импульсным излучением, которое было обнаружено в ходе эксперимента.

Для подтверждения этой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований и разработка соответствующих электродинамических моделей.

Что касается феноменологического моделирования излучения стационарных плазменных двигателей во временной области, то процесс, описывающий излучение в полосе пропускания приемника, может быть представлен в виде случайной, а в случае использования криптона – квазипериодической последовательности некоррелированных шумоподобных импульсов с заданной средней длительностью, куполообразной формой амплитудной огибающей и статистическими характеристиками, полученными в результате экспериментальных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Анализ временных реализаций амплитудной огибающей излучения СПД-70, полученных в полосах анализа шириной 140 МГц для частоты 0.9, 1.050, 1.200 и 1.350 ГГц, показал, что при работе на ксеноне и криптоне они представляют собой случайные последовательности импульсов, в которых присутствуют группы импульсов, образующих квазипериодические “пачки” увеличенной амплитуды. При этом для ксенона длительность “пачек” по уровню 0.5 составляет порядка 0.5...1 мкс при периоде повторения 6...10 мкс, а для криптона порядка 8...10 мкс при периоде повторения 16...20 мкс.

Исследование статистических характеристик излучения модели СПД-70 по временным реализациям, полученным в полосах анализа шириной 140 МГц для частот 0.9, 1.050, 1.200 и 1.35 ГГц показало, что для синфазной и квадратурной компонент комплексной огибающей процесса излучения полученные законы распределения существенно отличаются от гауссовского. Что касается распределения амплитудной огибающей процесса, то в общем случае имеет место отличие от рэлеевского закона распределения. При переходе с ксенона на криптон степень негауссовости и отличия от рэлеевского закона увеличиваются. При этом закон распределения фазы комплексной огибающей процесса близок к равномерному и инвариантен к типу рабочего тела.

При разработке феноменологических моделей можно рекомендовать представлять процесс, описывающий излучения СПД во временной области, в виде случайной, а в случае использования криптона – квазипериодической последовательности некоррелированных шумоподобных импульсов с заданной средней длительностью, куполообраз-

ной формой амплитудной огибающей и статистическими характеристиками, полученными в результате экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim V., Zakharchenko V., Merkurev D. et al. Influence of Xenon and Krypton Flow Rates through the Acceleration Channel of Morozov's Stationary Plasma Thruster on the Thrust Efficiency // Plasma Physical Reports. 2019. V. 45. Iss. 1. P. 11–20. <https://doi.org/10.1134/S1063780X19010082>
2. Kim V., Merkurev D., Shilov E., Zakharchenko V., Kalyazin V. Study of the low-power krypton-operated stationary plasma thruster plume // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V. 927. 13th Intern. Conf. Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (AMMAI'2020). 6–13 Sept. 2020, Alushta, Russia. 2020. Art. ID. 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/927/1/012053>
3. Плохих А.П., Важенин Н.А., Меркурьев Д.В. Влияние рабочих веществ на электромагнитную обстановку, создаваемую стационарными плазменными двигателями // Косм. исслед. 2023. Т. 61. № 5. <https://doi.org/10.31857/S0023420623700140>
4. Важенин Н.А. Эмпирические модели законов распределения импульсных помех от стационарных плазменных двигателей // Тр. МАИ. 2012. Т. 59. 15 с.
5. Плохих А.П., Важенин Н.А., Попов Г.А. Анализ влияния электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на помехоустойчивость канала связи “Земля – космический аппарат” // Косм. исслед. 2019. Т. 57. № 5. С. 339–346. (Cosmic Research. 2019. V. 57. № 5. P. 317–324.) <https://doi.org/10.1134/S0023420619050078>
6. Плохих А.П., Важенин Н.А., Попов Г.А., Шилов С.О. Спектральные характеристики собственного излучения электрических ракетных двигателей с замкнутым дрейфом электронов в радиодиапазоне для различных рабочих тел // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 5. С. 396–403.
7. Важенин Н.А., Плохих А.П. Имитационное моделирование электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Изв. Российской Акад. наук. Энергетика. 2014. № 6. С. 118–131.
8. Beiting E., Pollard J., Khayms V., Werthman L. Electromagnetic Emissions to 60 GHz from a BPT4000 EDM Hall Thruster // Intern. Electric Propulsion Conf. Toulouse France. 17–21 March 2003. Art. ID. IEPC-03-129. P. 17–21.
9. Beiting E., Eapen X., Pollard J. et al. Electromagnetic Emissions from PPS®1350 Hall Thruster // 31st Intern. Electric Propulsion Conf. 20–24 Sept. 2009, Ann Arbor, USA. Art. ID. IEPC-2009-071. 13 p.