УДК 629.7

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-78-93

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВЯЗИ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Кирдяшев К. П.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской Академии наук, Фрязинский филиал

141190, Московская область, г. Фрязино, пл. Академика Введенского, д. 1, Российская Федерация

Аннотация.

Цель исследования – рассмотрение вопросов прогнозирования электромагнитной обстановки и оценки совместимости бортового радиоэлектронного оборудования межпланетных космических аппаратов.

Процедура и методы исследования. Показано, что известные стандарты для оценки электромагнитной совместимости неприменимы для определения электромагнитных полей, создаваемых аппаратурой космических аппаратов. С учётом результатов проведённых стендовых испытаний разработаны расчётно-теоретические модели источников электромагнитных полей вблизи космических аппаратов.

Результаты исследования. Исследованы особенности взаимодействия по электромагнитным полям плазмы электрореактивных двигателей с радиоэлектронными средствами космических аппаратов. Представлены результаты анализа электромагнитной совместимости бортовых радиоэлектронных систем.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты проведённого исследования обеспечивают выбор оптимального диапазона частот для применяемых на межпланетных космических аппаратах средств радиосвязи. При этом необходим учёт различных эффектов аномального взаимодействия электромагнитных полей с плазменными образованиями, создаваемыми электрореактивными двигателями космических аппаратов.

Ключевые слова: пилотируемые полёты в космос, электрореактивные двигатели, стационарный плазменный двигатель, плазменные ускорители, космическая связь, электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, электромагнитные волны

THE ELECTROMAGNETIC PROBLEMS OF INTERPLANETARY SPACECRAFT COMMUNICATION

K. Kirdyashev

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino branch

1 ploshchad' Akademika Vvedenskogo, Fryazino 14190, Moscow Region, Russian Federation

Abstract.

The purpose of the study is to consider the issues of forecasting the electromagnetic environment and assess the compatibility of onboard radio-electronic equipment of interplanetary spacecraft.

Methodology and Approach. It is shown that well-known standards for assessing electromagnetic compatibility are not applicable for determining the electromagnetic fields generated by spacecraft equipment. Taking into account the results of bench tests conducted, theoretical and theoretical models of sources of electromagnetic fields near spacecraft have been developed.

Results. The features of interaction in the electromagnetic fields of the plasma of electric jets with the radio-electronic means of spacecraft are investigated. The results of the analysis of electromagnetic compatibility of airborne electronic systems are presented.

Theoretical and Practical implications. The results of the study provide the choice of the optimal frequency range for radio communications used on interplanetary spacecraft. In this case, it is necessary to take into account the various effects of the anomalous interaction of electromagnetic fields with plasma formations created by the electroreactive engines of spacecraft.

Keywords: human space flights, manned missions to Mars, electro jet engines, plasma accelerators, space communication, noise immunity efficiency, plasma electromagnetic radiation

Введение

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) и систем космических аппаратов приобретает особое значение при проектировании и эксплуатации радиолиний спутников связи и межпланетных космических аппаратов. ЭМС бортового оборудования предусматривает возможность его функционирования в соответствии с требуемыми техническими характеристиками в условиях создаваемой на космическом аппарате электромагнитной обстановки. Решение проблемы ЭМС РЭС космических аппаратов определяется назначением применяемого оборудования, параметрами и характеристиками наземных средств управления, связи и контроля работы бортовых систем, взаимным расположением источников электромагнитных полей и элементов бортовой аппаратуры, чувствительных к их воздействию.

Источниками наиболее интенсивного электромагнитного излучения, препятствующего нормальной работе систем радиосвязи, являются электрические ракетные двигатели (ЭРДУ), источники и ускорители плазмы для решения задач на космических аппаратах. Основные направления применений таких устройств определяются необходимостью коррекции орбит и стабилизации околоземных спутников связи, созданием тяговых модулей межпланетных космических аппаратов, исследованием перспектив борьбы с опасными космическими объектами (астероидами), разработкой и применением плазменных технологий в космосе, нейтрализацией электрических зарядов на космических аппаратах.

При разработке средств космической плазменной техники обычно рассматривается метод оценки ЭМС РЭС, основанный на применении известных стандартов MIL-STD-461B, MIL-STD-461D, MIL-STD-461E и MIL-STD-462. Проведённый анализ работы бортовых радиотехнических комплексов геостационарных спутников связи и межпланетных космических аппаратов свидетельствует о неприменимости этих стандартов на предельно допустимый уровень электромагнит-

ных полей, создаваемых аппаратурой космических аппаратов. Это связано с тем, что разработанные стандарты не учитывают особенности каналов воздействия двигателей на бортовую радиоаппаратуру и показатели их влияния на работу систем космических аппаратов. В связи с этим необходима разработка критериев и методов оценки ЭМС РЭС применительно к конкретной компоновке бортовой аппаратуры космических аппаратов, учитывающей расположение зон формирования электромагнитных полей и каналов их воздействия на бортовую радиоприёмную аппаратуру. В этих условиях анализ влияния ЭРДУ на эффективность функционирования и помехоустойчивость космических радиолиний необходимо производить на основе оценок отношения сигнал/шум во входных трактах бортовых радиоприёмных устройств.

Общая характеристика электромагнитной обстановки вблизи космических аппаратов

Исследование электромагнитного воздействия ЭРДУ на космическую связь сводится к решению электродинамических задач в системе взаимодействующих элементов электротехнического оборудования и бортовых радиотехнических комплексов, предназначенных для связи и управления полётами космических аппаратов (рис. 1). При анализе электромагнитной обстановки (рис. 2) вблизи космических аппаратов и условий прохождения сигналов в каналах радиосвязи обычно рассматриваются эффекты ослабления и рефракции радиоволн в создаваемых плазменных образованиях, флуктуации амплитуды и фазы сигналов по трассам радиолиний, искажения диаграмм направленности и экранировка приёмно-передающих антенн. Важным фактором воздействия электрореактивных двигателей на радиоэлектронную аппаратуру космических аппаратов является их электромагнитное излучение, препятствующее выделению сигналов в каналах радиосвязи.

Этим не ограничивается воздействие ЭРДУ на электромагнитную обстановку вблизи космического аппарата. На основе результатов проведённых стендовых испытаний установлен дополнительный фактор такого воздействия, связанный с усилением внешнего электромагнитного излучения в плазме двигательной установки. Формирование вблизи двигательной установки космического аппарата электромагнитных полей обусловлено различными элементами бортового радиотехнического комплекса, передающими микроволновыми антеннами систем космической радиосвязи, источниками паразитного излучения при работе бортовой аппаратуры. Возникающие при этом эффекты могут сопровождаться амплитудными, фазовыми и частотными искажениями сигналов в радиоканалах, а также взаимными помехами в приёмно-передающих устройствах систем связи космических аппаратах.

Анализ работы бортовых радиотехнических комплексов межпланетных космических аппаратов свидетельствует о неприменимости известных стандартов на предельно допустимый уровень электромагнитных полей, создаваемых аппаратурой космических аппаратов. Это связано с тем, что разработанные стандарты не учитывают особенности каналов воздействия двигателей на бортовую

радиоаппаратуру и показатели их влияния на работу систем космических аппаратов. В связи с этим необходима разработка критериев и методов оценки ЭМС РЭС космических аппаратов применительно к конкретной компоновке бортовой аппаратуры, определяющей зоны формирования и воздействия электромагнитного излучения на РЭС.

Рис. 1. Конструкция космического зонда с ядерной двигательной установкой для исследования астероидов и планет Солнечной системы.

Fig. 1. The design of a space probe with a nuclear propulsion system for the study of asteroids and planets of the solar system.

Источник: [5].

При анализе воздействия двигателей на бортовую радиоприёмную аппаратуру необходим расчёт их помехоустойчивости на основе расчётов отношения сигнал/шум на входе радиоприёмного устройства (табл. 1).

Рис. 2. Формирование электромагнитной обстановки вблизи космического аппарата.

Fig. 2. The formation of the electromagnetic environment near the spacecraft.

Источник: [6].

Результаты экспериментальных исследований микроволнового излучения стационарных плазменных двигателей

Проведённый комплекс испытаний различных типов электрореактивных двигателей [3–7] свидетельствует о том, что интенсивность их излучения в диапазонах частот бортовых радиоэлектронных систем изменяется в широких пределах в зависимости от конструкции установок, применяемых рабочих веществ и режимов ускорения плазмы (рис. 3). Максимальные значения спектральной плотности излучения достигают значений $10^{-5} \div 10^{-4}$ Вт/(м² МГц), что на 6–7 порядков превышает уровень равновесного (теплового) излучения выходящего из двигателя плазменного потока. Наиболее интенсивное излучение двигателей проявляется в высоковольтных эксплуатационных режимах плазменных двигателей, в которых формируются неравновесные токовые конфигурации и ускоряющие анодные слои.

В настоящее время в космической технике широко используется на отечественных и зарубежных космических аппаратах плазменный двигатель СПД [2; 9; 10], разрабатываемый в различных организациях в России и за рубежом (рис. 5). Подготовка стационарных плазменных двигателей для их применения на космических аппаратах потребовала проведения стендовых радиотехнических испытаний отдельных модулей объединённой двигательной установки, определения возможного вклада микроволнового излучения плазменного двигателя в формирование электромагнитной обстановки вблизи космического аппарата и оценки помехоустойчивости приёмных каналов бортового радиокомплекса. В

качестве примера проведён анализ совместимости по электромагнитному полю двигательного блока коррекции и ориентации с системами космического зонда для исследования планет Солнечной системы (рис. 1) и геостационарного спутника связи «Экспресс-1000» (рис. 4).

Рис. 3. Спектральные характеристики микроволнового излучения плазменных двигателей: 1 – двигатель с анодным слоем (ДАС); 2 – плазменно-ионный двигатель (ПИД), камера ионизации; 3 – магнетоплазмодинамический двигатель (МПДД), рабочее вещество азот; 4 – торцевой холловский двигатель (ТХД) с литиевой плазмой; 5 – стационарный плазменный двигатель (СПД); 6 – торцевой сильноточный двигатель (ТСД) с литиевой плазмой.

Fig. 3. Spectral characteristics of microwave radiation of plasma engines:

- 1 – an anode layer engine (DAS); 2 – plasma-ion engine (PID), ionization chamber;
- 3 – magnetoplasmodynamic engine (MTDD), the working substance is nitrogen;
- 4 – end Hall engine (TCD) with lithium plasma; 5 – stationary plasma engine (SPD);
- 6 – end high-current engine (TSD) with lithium plasma.

Источник: [7].

При проведении испытаний плазменных двигателей установлено, что возникающее при этом электромагнитное излучение носит нестационарный характер. В процессе испытаний наблюдаются выбросы излучения, на 1,5–2,5 порядка превышающие установившийся уровень и сопоставимые с величиной сигнала на входе приёмных каналов бортового радиокомплекса. Воздействие на радиоэлектронную аппаратуру шумов двигательной установки можно представить в виде хаотической импульсной помехи (рис. 6), учёт которой необходим для обеспечения помехоустойчивости цифровых каналов связи, используемых на космических аппаратах.

Рис. 4. Платформа ретранслятора геостационарного спутника связи (транспортное состояние космического аппарата с двигателями коррекции, антеннами и солнечными батареями).

Fig. 4. The platform of the repeater of the geostationary communications satellite (the transport state of the spacecraft with correction engines, antennas and solar panels).

Источник: [7].

Рис. 5. Фотография стационарного плазменного двигателя в составе блока коррекции орбиты межпланетного космического аппарата

Fig. 5. Photograph of a stationary plasma engine as part of the orbit correction block of an interplanetary spacecraft

Источник: [2].

Рис. 6. Нестационарное микроволновое излучение стационарного плазменного двигателя на различных временных интервалах.

Fig. 6. Unsteady microwave radiation of a stationary plasma engine at various time intervals.

Источник: [6].

Таблица 1 / Table 1

Оценки напряжённости электрического поля помех вблизи космического аппарата, создаваемых стационарным плазменным двигателем /
Estimates of the electric noise field strength near a spacecraft produced by a stationary plasma thruster

Диапазоны частот, МГц	0,01-0,1	0,1-1,0	1,0-10	10-100	100-1000	1000-10000
Напряжённость поля помех, дБ мкВ / (м МГц)	35-50	40-50	50-55	35-50	20-30	10-25

Источник: данные автора.

Теория микроволнового излучения стационарного плазменного двигателя

Условия возбуждения колебаний и формирования электромагнитного излучения рассмотрим на основе линейной теории пучковой неустойчивости плазменного потока [3; 4], выходящего из ускорительного канала стационарного плазменного двигателя СПД-АТОН. Результат проведённого теоретического исследования позволяет получить оценки интенсивности помех в перспективных для космической радиосвязи диапазонах частот.

Обычно теоретический анализ процессов возбуждения колебаний в СПД проводится в условиях применимости дрейфового приближения при описании

динамики электронов в ускорительном канале [9; 10]. В микроволновом диапазоне неприменимость дрейфового приближения следует из существенного превышения частотами исследуемых волновых процессов значений циклотронной частоты электронов. К тому же, нарушение условий применимости дрейфового приближения связано с неоднородностью распределения магнитного поля и концентрации электронов в выходящем из СПД плазменном потоке, при этом масштабы микроволновых волновых возмущений электрического поля не превышают циклотронный радиус электронов.

Диапазон частот микроволновой неустойчивости СПД соответствует высокочастотной ветви электронных колебаний, вычисленной по концентрации электронов и напряжённости магнитного поля за срезом ускорительного канала. В этой области плазменного потока для измеренных в экспериментах значениях напряжённости магнитного поля циклотронная частота электронов составляет ≤ 100 МГц. При соотношении плазменной и циклотронной частот электронов $\omega_{pe} \gg \omega_{ce}$ спектр высокочастотной ветви электронных колебаний можно представить в виде [8]:

$$\omega_1(\theta) = \omega_{pe} + (\omega_{ce}^2 / 2\omega_{pe}) \sin^2 \theta. \quad (1)$$

В этом соотношении учитывается зависимость частоты от угла θ между магнитным полем и направлением распространения плазменной волны.

При анализе механизма возбуждения микроволновых колебаний в СПД рассмотрим условия проявления пучковой неустойчивости плазменного потока, связанной с эмиссией электронов из катода-компенсатора. При этом будем учитывать особенности динамики электронов за срезом ускорительного канала, неоднородность плазменного потока и изменение топологии магнитного поля в зонах генерации микроволновых колебаний. Выбор пучково-плазменной модели источника микроволновых колебаний основывается на экспериментально установленном соответствии диапазона частот возбуждаемых колебаний значениям электронных плазменных частот, вычисленных по концентрации электронов в зонах генерации микроволновых колебаний.

Механизм неустойчивости плазменного потока, приводящей к возбуждению микроволновых колебаний, рассмотрим на основе представления о двухкомпонентной структуре функции распределения электронов по скоростям в зонах генерации микроволновых колебаний [4]. Такое представление о функции распределения электронов по скоростям основано на формировании пучка быстрых электронов, ускоренных в области катодного падения потенциала, и группы медленных (тепловых) электронов, образующихся в результате различных процессов (ионизационных столкновений, рассеяний электронов на колебаниях и вторичной электронной эмиссии с элементов конструкции плазменной установки).

Предельную энергию возбуждаемых колебаний можно оценить по энергии вводимых в плазменный поток электронов на основе квазилинейной теории пучковой неустойчивости плазмы [8]. В соответствии с представленными оценками концентрации и скорости электронного пучка предельная энергия микро-

волновых колебаний составляет 10^{-2} – 10^{-1} Дж/м³. Из результатов проведённых экспериментов следует, что максимальная плотность энергии микроволновых колебаний, измеренная в полосе частот 1–10 ГГц, составляет 10^{-4} – 10^{-3} Дж/м³, что существенно меньше предельных значений. Полученный экспериментальный результат свидетельствует о проявлении механизма насыщения интенсивности микроволновых колебаний при развитии пучковой неустойчивости плазменного потока. Ограничение роста интенсивности микроволновых колебаний обусловлено конечностью времени пучково-плазменного взаимодействия в продольно неоднородной области потока при смещении азимутального пучка электронов к срезу ускорительного канала.

Для параметров плазменного потока и электронного пучка за срезом ускорительного канала коэффициент усиления тепловых флуктуаций составляет 10^3 – 10^4 . При вычисленных по электронной температуре значениях плотности энергии тепловых флуктуаций $W_0 = 10^{-8}$ – 10^{-7} Дж/(м³ МГц) плотность энергии микроволновых колебаний, возбуждаемых в плазменном потоке, составляет 10^{-5} – 10^{-4} Дж/(м³ МГц), что согласуется с результатами проведённых измерений.

Полученные результаты теоретического анализа неустойчивости плазменного потока являются основой физической модели двигательной установки как источника электромагнитного излучения и оценки воздействия двигательной установки на радиоэлектронные системы космических аппаратов. Возникающие при работе двигателей электромагнитные поля являются источником информации о динамике электронного компонента и эффективности ускорения плазмы.

Воздействие источников электромагнитного излучения на плазменный двигатель космических аппаратов

В настоящее время отсутствуют данные о влиянии на работу ЭРДУ внешних электрических полей, создаваемых на космическом аппарате различными источниками электромагнитных излучений. Необходимость проведения анализа такого воздействия связана с опасностью создания сбоев, деградации характеристик и отклонений за пределы допусков, определённых требованиями к двигательной установке.

Проведём расчёт воздействия внешних электрических полей на работоспособность двигательной установки, входящей в состав блока коррекции орбиты межпланетного космического аппарата. Возможны различные подходы к оценке такого воздействия в условиях эксплуатации геостационарного спутника связи и формирования поля излучения ретранслятора. Воздействие на двигательную установку переменного электрического поля с напряжённостью $\vec{E}$ оценим на основе критерия, учитывающего соотношение плотностей энергии электрического поля и тепловой энергии плазмы. Такой критерий предполагает учёт соотношения между скоростью осцилляций электронов, в наибольшей степени подверженных воздействию поля, и их средней тепловой скоростью. Плотность энергии внешнего электрического поля вблизи двигательной установки определим, исходя из известного соотношения [1]:

$$W_E = (1/2) \epsilon_0 \tilde{E}^2. \quad (2)$$

При напряжённости внешнего электрического поля $\tilde{E}=10\text{--}20$ В/м, создаваемого источником излучения (ретранслятором) спутника связи, плотность энергии электрического поля составляет $4,5 \cdot 10^{-10} - 1,8 \cdot 10^{-9}$ Дж/м³. Плотность тепловой энергии электронов в плазменном потоке на выходе из двигательной установки:

$$W_{Te} = n_e kT_e \quad (3)$$

при концентрации электронов $n_e = 10^{11} - 10^{12}$ см⁻³ и температуре $kT_e = 10$ эВ не превышает $2 \cdot 10^{-2}$ Дж/м³. Из этого следует, что рассматриваемые электрические поля не вносят заметного вклада в энергию плазмы и не создают возмущений параметров электрического разряда в ускорительном канале плазменного двигателя. Об этом же свидетельствуют оценки скоростей осцилляций электронов во внешнем электрическом поле, определяемых по соотношению

$$\tilde{V}_e = \frac{e \tilde{E}}{m_e \omega}, \quad (4)$$

где ω – частота поля, m_e – масса электрона, e – заряд электрона. Для заданных значений напряжённости электрического поля скорость осцилляций электронов составляет $3 \cdot 10^2\text{--}10^3$ м/с, что существенно меньше их средних тепловых значений $7 \cdot 10^5\text{--}10^6$ м/с.

Критические поля, приводящие к изменению параметров электрического разряда, связаны с нелинейными эффектами и с дополнительной ионизацией рабочего вещества под действием внешнего поля. Проявление этих эффектов существенно зависит от диапазона частот, длительности воздействия внешнего электрического поля и времени между последовательными столкновениями электронов с нейтральными частицами. Как показывают оценки, критические поля, приводящие к заметному изменению характеристик электрического разряда в плазме двигательной установки, составляют более 100 В/м.

Другой подход к анализу возможного воздействия переменных электрических полей основан на определении возмущений потенциала $\tilde{U}$, наведённых на электродах и элементах конструкции плазменной установки. Для получения необходимых оценок такого воздействия следует исходить из величин мощности излучения, воспринимаемого внешними элементами конструкции двигательной установки W_0 . Определить значения $\tilde{U}$ можно с использованием приближенного соотношения $\tilde{U} = (W_0 Z_{pl})^{1/2}$, в котором Z_{pl} – эквивалентный импеданс плазмы двигательной установки на частотах воздействующего на двигатель электрического поля. Расчёты потоков энергии воздействующего электрического поля производились, исходя из заданных значений напряжённости поля в диапазоне частот 1–10 ГГц. В этом диапазоне расположены частоты собственных электронных колебаний, на которых плазма двигательной установки обладает

наименьшей проводимостью, связанной с эффективной частотой электронных столкновений. Как следует из выражения для диэлектрической проницаемости плазмы, эквивалентный импеданс цилиндрического слоя, моделирующего структуру электрического разряда на частотах электронных плазменных колебаний, можно представить в виде:

$$Z_{pl} = 1 / \epsilon_0 v_e \Delta l, \quad (5)$$

в котором v_e – эффективная частота электронных столкновений, Δl – длина цилиндрического слоя. Для характерных значений входящих в (5) параметров эквивалентный импеданс на резонансных частотах плазмы двигательной установки составляет порядка 10^6 Ом. По этой причине при определённой по электрическому полю воспринимаемой мощности излучения, осцилляции напряжения на электродах и элементах конструкции установки достигают максимальных значений.

Мощность, воспринимаемую элементами конструкции, оценим, исходя из представления о плотности потока энергии электромагнитного излучения внешнего источника, воздействующего на двигательную установку:

$$W_0 = (1/2) \eta \epsilon_0 c \tilde{E}^2 S_0, \quad (6)$$

где S_0 – площадь элементов конструкции, воспринимающих излучение внешнего источника, η – коэффициент эффективности воздействия, ограниченный отражением падающего излучения и его поглощением во внешних слоях плазмы, создаваемой двигательной установкой.

При воздействии высокочастотных (свыше 10 МГц) полей на электронный компонент плазмы двигательной установки происходит нагрев электронов и возможны нелинейные эффекты, изменяющие характеристики электрического разряда в области ускорения плазмы и в выходящем плазменном потоке. Как показывают оценки, для заданных значений напряжённости электрического поля, воздействующего на плазму двигательной установки, максимальные осцилляции потенциала на электродах и элементах конструкции установки не превышают 1-5 В, что существенно меньше характерных значений потенциалов в ускорительном канале. Представленные в табл. 2 данные соответствуют диапазонам рабочих частот связи космического аппарата на базе платформы «Экспресс-1000». Из результатов расчётов следует, что наведённые на элементах конструкции двигателя осцилляции напряжения не превышают разности потенциалов в области электрического разряда и ускорения плазмы и не влияют на режим работы двигательной установки. Указанные значения наведённого потенциала электродов соответствуют резонансным частотам собственных колебаний плазмы двигательной установки, сосредоточенных в узких спектральных областях. Вне плазменных резонансов следует ожидать меньших значений наведённого потенциала, что позволяет исключить возможные эффекты воздействия на блок коррекции спутника связи внешних электрических полей.

Таблица 2 / Table 2

Колебания потенциала на электродах двигательной установки, наведённые внешними источниками электрических полей /

Oscillations of the potential on the electrodes of the propulsion system induced by external electric field sources

Диапазон частот, МГц	0,01-26000	3385-3430	3400-4800 10700-12750
Напряжённость внешнего электрического поля, В/м	1,5-2,5	5-10	15-20
Мощность, воспринимаемая элементами конструкции двигательной установки, Вт	$(1,3-1,5) \cdot 10^{-5}$	$(1,2-1,4) \cdot 10^{-4}$	$(2,7-3,2) \cdot 10^{-4}$
Колебания наведённого потенциала на электродах, В	1,6-2,5	3,2-3,5	4,6-4,9

Источник: данные автора.

Другой подход к оценке воздействия электрических полей, создаваемых внешними источниками, на плазму двигательной установки основывается на квазистатическом приближении для описания полей и учёте связи источника электрических полей с элементами конструкции двигателя. При таком подходе к анализу воздействия внешних полей на плазменный двигатель максимальная величина осцилляций наведённого потенциала на электродах двигателя находится в указанных выше пределах.

Наиболее эффективно возбуждение наведённых на электродах колебаний при воздействии внешних электрических полей на резонансных частотах собственных колебаний плазмы двигательной установки, на которых проводимость плазмы принимает минимальное значение. При оценке потоков энергии, воспринимаемой двигательной установкой, приняты размеры внешних элементов конструкции экспериментальной модели двигателя вблизи среза ускорительного канала. Импеданс слоя плазмы в выходящем из двигателя плазменном потоке определяется в основном эффективной частотой электронных столкновений и составляет порядка 10^6 Ом.

Внешние электрические поля на частотах свыше 10 МГц не оказывают влияния на динамику ионного компонента плазмы и, соответственно, на временную структуру разряда в ускорительном канале двигательной установки. В рассматриваемых диапазонах частот воздействие внешних полей может привести к модуляции скоростей электронов в катодной области разряда, развитию электронных колебательных процессов и возможному проявлению турбулентных эффектов.

Следует отметить эффект формирования поля вторичного электромагнитного излучения вследствие воздействия на двигательную установку электрического поля, выходящего из бортового радиотехнического комплекса на частоте гетеродина ретранслятора [7]. Такой эффект может привести к изменению электромагнитной обстановки вблизи блока коррекции и искажениям сигналов

в каналах связи. В проведённых экспериментах мощность микроволнового генератора на частотах 2–4 ГГц не превышала 10^{-2} Вт, что соответствовало напряжённости создаваемого электрического поля (1–1,5) В/м в зоне выхода плазменного потока из ускорительного канала. Существенно, что при указанной напряжённости электрического поля, создаваемого внешним источником во время проведения стендовых испытаний, каких-либо изменений в функционировании двигательных установок не наблюдалось.

Заключение

Реализация межпланетных космических полётов связана с необходимостью разработки и применения высокоэффективных двигательных установок на основе известных механизмов электромагнитного ускорения плазмы. В эксплуатационных режимах таких двигателей вблизи космических аппаратов формируется поле электромагнитного излучения, препятствующее выделению сигналов в линиях дальней космической связи. Результаты проведённого исследования обеспечивают выбор оптимального диапазона частот для применяемых на межпланетных космических аппаратах средств радиосвязи. При этом необходим учёт различных эффектов аномального взаимодействия электромагнитных полей с плазменными образованиями, создаваемыми электрореактивными двигателями космических аппаратов и приводящими к возможным сбоям в работе каналов связи и бортовой электротехнической аппаратуры.

Возбуждение электромагнитных полей вблизи космических аппаратов обеспечивает выбор оптимального диапазона частот для применения в межпланетных космических аппаратах в качестве средств радиосвязи.

Статья поступила в редакцию 02.06.2020 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed according to the state task of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.
2. Ким В. П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 3. С. 45–59.
3. Кирдяшев К. П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. 144 с.

4. Кирдяшев К. П. Микроволновые процессы в стационарном плазменном двигателе СПД-АТОН // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 9. С. 841–852.
5. Кирдяшев К. П. Актуальные проблемы радиосвязи при исследовании Солнечной системы космическими аппаратами с плазменными двигателями. Часть I. // Наука и технологии в промышленности. 2008. № 3. С. 14–20.
6. Кирдяшев К. П. Актуальные проблемы радиосвязи при исследовании Солнечной системы космическими аппаратами с плазменными двигателями. Часть II. // Наука и технологии в промышленности. 2008. № 4. С. 50–61.
7. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. М.: Атомиздат, 1975. 272 с.
8. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. 576 с.
9. Kirdyashev K. P. Microwave Processes in the SPD-ATON Stationary Plasma Thruster // Plasma Physics Reports. 2016. Vol. 42. Iss. 9. P. 859–869.
10. Morozov A. I., Savel'ev V. V. Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory // Reviews of Plasma Physics. Vol. 21 / eds. Kadomtsev B. B., Shafranov Vitaly D. New York: Consultant Bureau, 2000. P. 203–391.

REFERENCES

1. Golant V. E. *Sverkhvysokochastotnye metody issledovaniya plazmy* [Microwave plasma research methods]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 327 p.
2. Kim V. P. [Design features and operating procedures in advanced Morozov's stationary plasma thrusters]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics], 2015, vol. 85, no. 3, pp. 45–59.
3. Kirdyashev K. P. *Vysokochastotnye volnovye protsessy v plazmodinamicheskikh sistemakh* [High-frequency wave processes in plasmodynamic systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 144 p.
4. Kirdyashev K. P. [Microwave processes in the SPD-ATON stationary plasma thruster]. In: *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports], 2016, vol. 42, no. 9, pp. 841–852.
5. Kirdyashev K. P. [Actual problems of radio communications in the study of the Solar system by spacecraft with plasma engines. Chast' I]. In: *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry], 2008, no. 3, pp. 14–20.
6. Kirdyashev K. P. [Actual problems of radio communications in the study of the Solar system by spacecraft with plasma engines. Chast' II]. In: *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry], 2008, no. 4, pp. 50–61.
5. Kirdyashev K. P. [Actual problems of radio communications in the study of the Solar system by spacecraft with plasma engines s]. In: *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*. CHast' I. 2008. № 3. S. 14–20. CHast' II, 2008, no. 4, pp. 50–61.
6. Kirdyashev K. P. [Electromagnetic Compatibility of Stationary Plasma-Thruster with Spacecraft Radioelectronic System]. In: *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti* [Technologies of electromagnetic compatibility], 2009, no. 2 (29), pp. 19–30.
7. Mikhailovskii A. B. *Teoriya plazmennyykh neustoichivostei. T. 1. Neustoichivosti odnorodnoi plazmy* [Theory of plasma instabilities. Vol. 1. The instability of the homogeneous plasma]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p.
8. Morozov A. I. *Vvedenie v plazmodinamiku* [Introduction to plasmadynamic]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 576 p.
9. Kirdyashev K. P. Microwave Processes in the SPD-ATON Stationary Plasma Thruster. In: *Plasma Physics Reports*, 2016, vol. 42, iss. 9, pp. 859–869.
10. Morozov A. I., Savel'ev V. V. Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory. In: *Reviews of Plasma Physics. Vol. 21*. New York, Consultant Bureau Publ., 2000, pp. 203–391.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирдяшев Константин Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной Премии СССР, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской Академии наук, Фрязинский филиал;

e-mail: kpk@ms.ire.rssi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konstantin P. Kirdyashev – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, USSR State Prize Laureate, Senior Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino branch;

e-mail: kpk@ms.ire.rssi.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Кирдяшев К. П. Электромагнитные проблемы связи с межпланетными космическими аппаратами // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. №2. С. 78–93.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-78-93

FOR CITATION

Kirdyashev K. P. The electromagnetic problems of interplanetary spacecraft communication. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 78–93.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-78-93