
УДК 621.391.2

**Влияние электромагнитного излучения стационарных
плазменных двигателей на шумовые характеристики
радиолиний космической связи**

Важенин Н. А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
Россия*

e-mail: riame@sokol.ru

Аннотация

В рамках аппроксимации белым гауссовым шумом проводится анализ влияния излучения стационарных плазменных двигателей на радиолинии космической связи. На основе результатов экспериментальных исследований излучения стационарных плазменных двигателей приводятся количественные оценки ухудшения отношения сигнал-шум для различных режимов работы двигателей. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и анализе помехоустойчивости систем космической связи, функционирующих при воздействии данного вида помех.

Ключевые слова: космическая связь, стационарные плазменные двигатели, помехоустойчивость

1. Введение

Анализ результатов экспериментальных исследований собственного электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей (СПД),

представляющих собой частный случай электрических ракетных двигателей (ЭРД), показал, что их собственное электромагнитное излучение представляет собой широкополосный случайный процесс, спектральная плотность которого лежит в пределах от десятков Гц до единиц или десятков ГГц [1-14].

В связи с этим, учитывая относительную узкополосность систем космической связи, традиционно одной из наиболее распространенных моделей излучения ЭРД, используемых для предварительного анализа помехоустойчивости систем связи, является модель в виде эквивалентного аддитивного белого гауссового шума в полосе приемной системы. Подобный подход позволяет в первом приближении относительно просто количественно оценить влияние излучения ЭРД на показатели качества (достоверность, дальность действия, скорость передачи информации и т.д.) систем связи [15-21].

В то же время, с точки зрения инженерной практики актуальной является задача разработки методики расчета уровня такого эквивалентного шума и оценки уменьшения отношения сигнал-шум на входе приемного тракта в случае воздействия излучения СПД. Данная методика должна основываться на результатах экспериментальных измерений характеристик собственного электромагнитного излучения конкретных типов СПД. [1-14].

В связи с этим, ниже вначале будет рассмотрена взаимосвязь результатов экспериментальных измерений характеристик излучения СПД в спектральной области с характеристиками эквивалентного белого гауссового шума. А затем представлены оценки эквивалентного уменьшения отношения сигнал-шум на входе приемной системы для различных шумовых характеристик приемного тракта и различных режимов работы СПД.

2. Математическое описание электромагнитного излучения СПД в частотной области

Обычно по результатам экспериментальных исследований может быть определена зависимость от частоты плотности потока мощности или напряженности электромагнитного поля (ЭМП) в раскрыве приемной антенны. В большинстве случаев можно считать, что в пределах полосы пропускания входных каскадов приемников систем космической связи эта спектральная зависимость примерно постоянна. В этом случае в качестве первого приближения можно использовать модель излучения ЭРД в виде эквивалентного белого гауссового шума, имеющего такое же значение спектральной плотности в полосе приемника, как и реальная помеха от ЭРД.

2.1. Характеристики эквивалентных тепловых шумов на входе приемной системы

Напряженность электрического поля на входе антенны E_A обеспечивает формирование на входе первого каскада усиления приемной системы сигнала с амплитудой

$$U_{Прм} = \frac{E_A}{A_F} L_F, \quad (1)$$

где L_F - ослабление сигнала в фидере, A_F - антенн-фактор, связывающий напряженность поля в апертуре антенны E_A и напряжение сигнала на выходе антенны U_A ,

$$A_F = \frac{E_A}{U_A} = \frac{\sqrt{4\pi Z_0 / R_n}}{\lambda \sqrt{G_A \eta_A}} \cong \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G_A \eta_A}}, \quad (2)$$

$Z_0 = 120\pi$ Ом - волновое сопротивление свободного пространства, R_n - сопротивление нагрузки (обычно 50 Ом), G_A и η_A - соответственно коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент полезного действия (КПД) антенны, λ - длина волны.

В качестве основных источников шумовых помех обычно рассматриваются: собственные шумы приемника, собственные шумы антенно-фидерного тракта и внешние шумы, пересчитанные на вход приемника. Будем

считать, что приемник по входу нагружен на сопротивление антенно-фидерного тракта R_A , согласованное с собственным входным сопротивлением приемника, а по выходу - на согласованную нагрузку R_{out} . Предполагается, что обе нагрузки находятся при температуре T_0 (в соответствии с ГОСТ 24375-80 [22] $T_0 = 293^\circ K$, в соответствии с ANSI/IEEE Std 161-1971 $T_0 = 290^\circ K$ [23]) и что все шумовые сигналы, приведенные к входу четырехполюсника, в пределах полосы пропускания радиотракта с достаточной точностью могут быть представлены в виде белого гауссового шума с заданной спектральной плотностью.

Мощность шумов теплового источника однозначно определяется его физической температурой. Для нетепловых источников шумов удобно ввести понятие эквивалентной шумовой температуры, определяемой температурой равномерно нагретого резистора, спектральная плотность мощности шума которого равна спектральной плотности мощности шума рассматриваемого источника. Таким образом, в рамках рассматриваемого подхода всем шумовым источникам может быть поставлена в соответствие своя эквивалентная шумовая температура.

Спектральная плотность эквивалентного белого гауссова шума на входе приемника определяется как $G_0 = k_b T_\Sigma$, где $k_b = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ ДжК}^{-1}$ - постоянная Больцмана, T_Σ - эквивалентная суммарная шумовая температура на входе приемника. В рассматриваемом случае суммарную шумовую температуру, отнесенную к входу малошумящего усилителя (МШУ), включенного на входе приемного устройства, можно представить в виде [25]

$$T_\Sigma = T_A \eta_A \eta_\Phi + T_{A0} \eta_\Phi (1 - \eta_A) + T_{\Phi 0} (1 - \eta_\Phi) + T_{МШУ} + T_{Прм} / K_{МШУ}, \quad (3)$$

где T_A - эквивалентная шумовая температура антенны, учитывающая внешние источники шумов, $T_{A0}, T_{\Phi 0}$ - физические температуры антенны и фидерной линии, $T_{МШУ}, K_{МШУ}$ - эквивалентная шумовая температура и коэффициент усиления по мощности МШУ, $T_{Прм}$ - эквивалентная шумовая

температура приемника (смесителя и первых каскадов УПЧ), η_A, η_Φ - коэффициенты передачи (КПД) антенны и фидерной линии.

Шумовые свойства приемного тракта обычно характеризуются [22] шум-фактором (Noise Factor):

$$F_N = \frac{h_0}{h_1} = \frac{P_{nOut}}{P_{nIn}} \quad (4)$$

или коэффициентом шума (Noise Figure)

$$K_N = 10 \lg F_N, \quad (5)$$

где h_1 - отношение сигнал/шум на выходе приемного тракта, h_0 - отношение сигнал/шум на входе приемного тракта, P_{nOut}, P_{nIn} - мощность шума соответственно на выходе и входе приемного тракта. Во многих случаях понятия шум-фактор и коэффициент шума рассматриваются как синонимы, численное значение которых может быть выражено в линейном или логарифмическом масштабе. Связь шум-фактора приемного тракта с его эквивалентной шумовой температурой определяется выражением [25]:

$$F_N = 1 + \frac{T_\Sigma}{T_0}. \quad (6)$$

2.3 Взаимосвязь параметров эквивалентного белого гауссова шума на входе приемного тракта с характеристиками шумового излучения СПД

Рассмотрим математические соотношения, позволяющие рассчитывать уровень эквивалентного аддитивного белого гауссовского шума, связанного с собственным электромагнитным излучением (ЭМИ) СПД, на входе приемного тракта систем космической связи. Настоящая методика, алгоритмы и программное обеспечение базируются на использовании результатов экспериментальных измерений характеристик собственного ЭМИ СПД.

В процессе измерения характеристик излучения СПД на экспериментальной установке определялись спектрально-временные характеристики излучения, в частности, напряженность электромагнитного

поля (ЭМП) в апертуре измерительной антенны, установленной на расстоянии D_{mgr} от СПД.

Экспериментальные исследования характеристик излучения СПД показали, что во многих случаях, например при относительно узкополосном приемном тракте, СПД является источником эквивалентного шумового излучения, которое в полосе пропускания приемника можно считать белым гауссовским шумом.

Пусть в результате экспериментальных исследований получено эффективное значение напряженности электромагнитного поля $E_{f_{mgrdB\Delta f}}$, имеющее размерность дБмкВ/м, измеренное на расстоянии D_{mgr} от СПД в полосе частот Δf_{RBW} . Для каждой частоты данное значение может быть пересчитано в соответствующее значение напряженности электромагнитного поля, выраженное в В/м:

$$E_{f_{mgr\Delta f}} = 10^{\frac{E_{f_{mgrdB\Delta f}}}{20} - 6}, \quad (7)$$

или в эквивалентное значение спектральной плотности потока мощности в Вт/м² Гц, рассматриваемой в полосе Δf_{RBW} ,

$$P_{f_{mgr}} = \frac{E_{f_{mgr\Delta f}}^2}{Z_0 \Delta f_{RBW}}, \quad (8)$$

где $Z_0 = 120\pi$ Ом - волновое сопротивление свободного пространства, Δf_{RBW} - полоса частот, в которой осуществлялось измерение характеристик излучения ЭРД (для $f \geq 1$ ГГц эта полоса обычно принимается равной 1 МГц).

Аналогично может быть определена плотность потока мощности для фонового излучения вакуумной камеры P_{f_0} . При этом спектральная плотность потока мощности собственного излучения ЭРД может быть определена как

$$P_{f_{EPT}} = P_{f_{mgr}} - P_{f_0}. \quad (9)$$

С другой стороны,

$$\Pi_{f_{EPT}} = \frac{P_{f_{EPT}}}{4\pi D_{mgr}^2 \Delta f_{RBW}} L_p, \quad (10)$$

где $P_{f_{EPT}}$ - эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) СПД (Вт) на частоте f в полосе Δf_{RBW} , коэффициент L_p определяет потери, связанные с распространением радиосигнала в ионизированной среде. Следовательно,

$$P_{f_{EPT}} = 4\pi D_{mgr}^2 \Pi_{f_{EPT}} \Delta f_{RBW} / L_p = 4\pi D_{mgr}^2 \frac{E_{f_{mgrM}}^2 - E_{f_{0M}}^2}{Z_0 \cdot L_p}, \quad (11)$$

а мощность шумового сигнала от СПД в полосе Δf_{RBW} на входе приемника может быть определена как

$$P_{Rx_{EPT}} = \frac{P_{f_{EPT}}}{4\pi D_{Rx}^2} S_{A_{Rx}} \eta_{Rx} = \left(\frac{D_{mgr}}{D_{Rx}} \right)^2 \frac{(E_{f_{mgrM}}^2 - E_{f_{0M}}^2)}{Z_0 L_p} \frac{G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}} g_{A_{Rx}}(\theta, \varphi) \eta_{Rx} \lambda^2}{4\pi}, \quad (12)$$

соответственно, спектральная плотность мощности на входе приемника будет равна

$$N_{EPT} = \frac{P_{Rx_{EPT}}}{\Delta f_{RBW}} = \left(\frac{D_{mgr}}{D_{Rx}} \right)^2 \frac{(E_{f_{mgrM}}^2 - E_{f_{0M}}^2)}{Z_0 \cdot \Delta f_{RBW} \cdot L_p} \frac{G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}} g_{A_{Rx}}(\theta, \varphi) \eta_{Rx} \lambda^2}{4\pi}, \quad (13)$$

где $S_{A_{Rx}}$, $G_{A_{Rx}}$, $\eta_{A_{Rx}}$, $g_{A_{Rx}}(\theta, \varphi)$ - эффективная площадь, КНД, КПД и значение диаграммы направленности приемной антенны (ДНА) для заданного угла визирования на ЭРД, D_{Rx} - расстояние между ЭРД и приемной антенной, λ - длина волны несущего колебания, η_{Rx} - коэффициент передачи приемного фидерного тракта.

В (12) учтено, что обычно выполняется условие $S_{A_{Rx}} \gg \lambda^2$ и тогда можно воспользоваться взаимосвязью эффективной площади антенны с КНД антенны $G_{A_{Rx}}$:

$$S_{A_{Rx}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}}. \quad (14)$$

Если в качестве модели шумового излучения СПД использовать аддитивный белый гауссов шум (АБГШ), то по известным экспериментальным

данным для рассматриваемого частотного диапазона можно определить приращение эквивалентной шумовой температуры антенны, вызванное работой ЭРД:

$$T_{EPT} = \frac{N_{EPT}}{k_b} = \frac{(E_{f_{mgr\Delta f}}^2 - E_{f_{0\Delta f}}^2) G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}} g_{A_{Rx}}(\theta, \varphi) \eta_{Rx} \lambda^2 \left(\frac{D_{mgr}}{D_{Rx}} \right)^2}{4\pi \cdot k_b Z_0 \Delta f_{RBW} \cdot L_p} \quad (15)$$

3. Расчет приращения эквивалентной шумовой температуры приемной антенны, связанного с работой СПД

Примеры зависимости приращения эквивалентной шумовой температуры антенны, связанного с шумовым излучением СПД, для различных значений фонового шума приведены на рисунке 1. Расчеты проводились для случая приема излучения ЭРД по боковым лепесткам ДНА, когда $G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}} g_{A_{Rx}}(\theta, \varphi) = 1$, $\lambda = 4.2 \text{ см}$, $D_{mgr} = D_{Rx} = 1 \text{ м}$.

Расчетное значение уровня шумового фона $E_{f_{0\Delta f}}^2$ на частоте 7.2 ГГц для 290°К принято равным примерно 43.4 дБмкВ/м/МГц, что соответствует результатам экспериментальных измерений. График зависимости приращения эквивалентной шумовой температуры антенны T_{EPT} , связанного с работой СПД, от измеренного уровня суммарного шумового сигнала на входе антенны $E_{f_{mgr\Delta f}}$ приведен для тех же исходных данных на рисунке 2. Полученные результаты вместе с результатами измерений, сведенными в таблицу 1, могут служить исходными данными для расчета влияния собственного шумового излучения СПД на характеристики приемного тракта радиосистем космической связи при использовании модели излучения в виде АБГШ.

На рисунке 3 приведены зависимости приращения эквивалентной шумовой температуры T_{EPT} за счет излучения ЭРД от расстояния D_{Rx} приемной антенны до СПД. Графики приведены для различных значений уровня собственного излучения ЭРД от 44 до 60 дБмкВ/м/МГц, измеренного на

расстоянии 1 м от СПД. В качестве примера расчеты проводились для уровней боковых лепестков остронаправленной приемной антенны аналогичной использованной в проекте Deep Space 1 [24].

Предполагалось, что ширина главного лепестка антенны по уровню половинной мощности 8° , коэффициент усиления антенны $G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}}$ примерно 27.4 дБ и антенна располагается на расстоянии D_{Rx} от ЭРД. Уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны (ДНА) принят равным -30 дБ по отношению к главному лепестку, то есть коэффициент усиления при приеме излучения ЭРД по боковым лепесткам составил -2.6 дБ.

Видно, что эквивалентная шумовая температура ЭРД существенно зависит от расстояния приемной антенны от ЭРД и, варьируя этот параметр, можно добиться существенного ослабления влияния ЭРД на функционирование систем связи. Как показал анализ экспериментальных данных, средний уровень собственного излучения СПД (холловских ЭРД) рассмотренных классов можно в первом приближении принять равным 48 дБмкВ/м/МГц. При этом диапазон возможных значений шумовой температуры за счет излучения ЭРД составляет от 1000°K до 20°K при изменении расстояния до ЭРД от 0.5 до 4 м.

Зависимость приращения шумовой температуры антенны за счет излучения ЭРД от коэффициента усиления приемной антенны приведена на рисунке 4 для тех же исходных данных и расстояния до ЭРД, равного 2 м. Сводные данные по результатам экспериментального определения уровней собственного электромагнитного излучения ЭРД в диапазоне 7...8 ГГц и $\Delta f_{RBW} = RBW = 1$ МГц приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сводные данные об уровнях собственного электромагнитного излучения ЭРД

№ п/п	ЭРД	Потребляемая мощность (кВт)	Уровень ЭМИ (дБмкВ/м/МГц)	Уровень фона (двигатель выключен) (дБмкВ/м/МГц)	Превышение фона (дБ)	Источник	Примечание
1	SPT-100	0.66	-	42...44	0	[1]	На частотах 1...18 ГГц в задней полусфере излучение не зафиксировано.
2	SPT-100	1.35	ВП ¹ 51...52 ГП ² 48...60 SN10 52...57	ВП 51...52 ГП 48...50 SN10 48...50	ВП 0 ГП 0...10 SN10 4...7	[3]	SN10 – ресурсные испытания 500 час.
3	SPT-140	3.4	50...47	42...44	8...3	[2]	
4	BPT-4000 Hall thruster	3...4.5	53...45	44	9...1	[4]	
5	BPT-4000 Hall thruster	3...4.5	ГП 48...47 ВП до 53	43...44	до 10	[5]	
6	BPT-4000 Hall thruster	3...4.5	60...65	52...54		[5]	Для ресурсных испытаний. RBW=2MHz
7	Aerospace Corp. Hall thruster	0.4	56...53	51...52	5...1	[6]	
8	СПД-100-1		37.5...42.5	35...39	2.5...4	[14]	
9	СПД-100-2		до 41...45	35...38.5	6...6.5	[14]	
10	СПД-100-3		до 39.5...44	38...42	1.5...2	[14]	

¹ ВП – вертикальная поляризация² ГП – горизонтальная поляризация

№ п/п	ЭРД	Потребляемая мощность (кВт)	Уровень ЭМИ (дБмкВ/м/МГц)	Уровень фона (двигатель выключен) (дБмкВ/м/МГц)	Превышение фона (дБ)	Источник	Примечание
11	СПД-140-2		39-43	37-42	2...1	[14]	

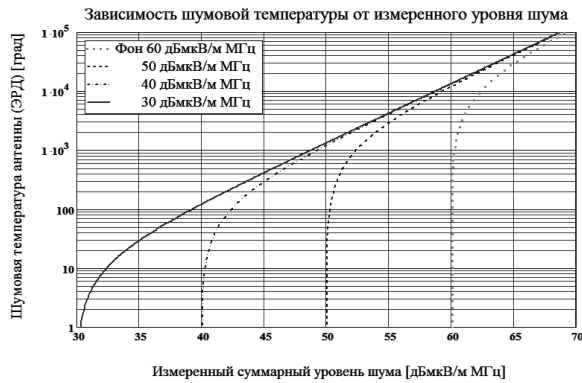


Рисунок 1

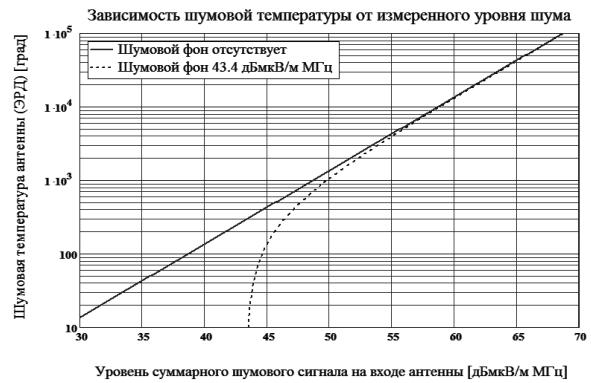


Рисунок 2

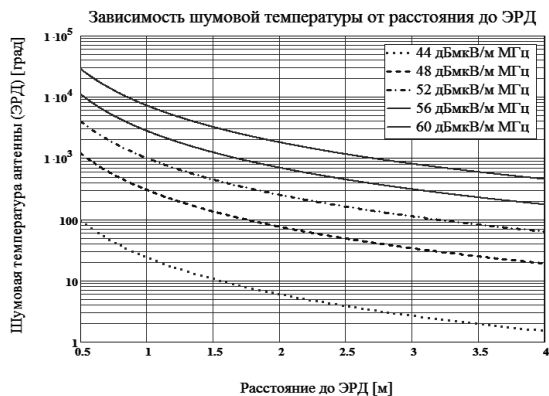


Рисунок 3

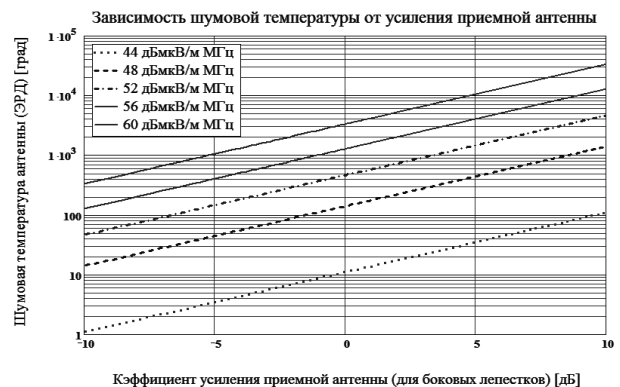


Рисунок 4

4. Влияние электромагнитного излучения СПД на шумовые характеристики систем космической связи

Рассмотрим методику расчета изменения отношения сигнал-шум на входе приемного тракта за счет шумового излучения СПД. Будем считать, что СПД в этих условиях является источником шумового излучения с эффективной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ), равной $P_{EIRP} = P_{fEPT}$ на частоте f и в

полосе Δf_{RBW} . При этом спектральная плотность потока мощности в апертуре измерительной антенны определяется соотношением (10), а взаимосвязь спектральной плотности потока мощности и эффективного значения напряженности ЭМП в апертуре антенны описывается соотношением (8).

Для количественной оценки влияния излучения ЭРД на шумовые характеристики приемного тракта можно рассмотреть изменение уровня спектральной плотности мощности (СПМ) шума на входе приемного тракта за счет дополнительного шума (13), формируемого ЭРД, относительно СПМ теплового шума приемника:

$$\eta_{EPT} = \frac{N_{EPT}}{N_{n_0}} = \frac{T_{EPT}}{T_{n_0}} = \frac{(E_{f_{mgr\Delta f}}^2 - E_{f_{0\Delta f}}^2) G_{A_{Rx}} \eta_{A_{Rx}} \varepsilon_{A_{Rx}}(\theta, \varphi) \eta_{Rx} \lambda^2 \left(\frac{D_{mgr}}{D_{Rx}} \right)^2}{4\pi \cdot k_b Z_0 \Delta f_{RBW} L_p T_{n_0}}, \quad (16)$$

здесь N_{EPT} - СПМ эквивалентного АБГШ, формируемого ЭРД на входе приемного тракта; T_{EPT} - шумовая температура эквивалентного АБГШ, формируемого ЭРД на входе приемного тракта; $N_{n_0} = k_b T_{n_0}$ - СПМ теплового АБГШ на входе приемного тракта; T_{n_0} - шумовая температура теплового АБГШ на входе приемного тракта;

С точки зрения наглядного представления результатов анализа влияния излучения ЭРД на характеристики помехоустойчивости приемного тракта удобно использовать показатель в виде относительного изменения отношения сигнал-шум на входе приемного тракта за счет влияния ЭРД, рассчитанного для максимальной дальности действия системы связи, то есть для порогового отношения сигнал-шум:

$$\chi_{EPT} = \frac{h_0^2}{h_{EPT}^2} = \frac{E_{s0}/N_{n_0}}{E_{s0}/(N_{n_0} + N_{EPT})} = 1 + \frac{N_{EPT}}{N_{n_0}} = 1 + \frac{T_{EPT}}{T_{n_0}} = 1 + \eta_{EPT}, \quad (17)$$

где h_0^2 - отношение сигнал-шум при выключенном ЭРД, совпадающее с пороговым отношением сигнал-шум, h_{EPT}^2 - отношение сигнал-шум при включенном ЭРД, E_{s0} - пороговое значение энергии сигнала на максимальной дальности, характеризующее пороговую чувствительность приемного тракта. В

этом случае изменение отношения сигнал-шум будет однозначно связано с изменением максимальной дальности действия системы связи.

Для проведения инженерных расчетов соотношение (16) удобно представить в следующем виде:

$$\eta_{EPT_{dB}} = E_{EPT_{dBuV/m}} + G_{A_{Rx_{dB}}} + \eta_{A_{Rx_{dB}}} + g_{A_{Rx_{dB}}}(\theta, \varphi) + \eta_{Rx_{dB}} + \lambda_{dBm} - L_{p_{dB}} - \Delta f_{RBW_{dBHz}} - T_{n_{0dB^{\circ}K}} + 20 \lg \frac{D_{mgr}}{D_{Rx}} + 71.84_{dB} \quad (18)$$

где все входящие в формулу величины выражены в логарифмическом масштабе.

В случае использования пакета из M_{EPT} ЭРД, учитывая шумоподобный характер излучения ЭРД, в первом приближении можно допустить некогерентное сложение излучаемых ЭРД сигналов, при котором суммарная мощность приносимого ЭРД шума увеличивается в M_{EPT} раз и соответственно $\eta_{M_{EPT}} = M_{EPT} \eta_{EPT}$.

В соответствии с изложенной методикой для полученных ранее экспериментальных результатов измерения собственного электромагнитного излучения ЭРД СПД-100-2 и СПД-100-3 [14] были проведены расчеты величины деградации отношения сигнал-шум на максимальной дальности действия системы передачи информации Земля-КА.

Расчеты проводились для суммарной шумовой температуры на входе приемника при выключенном ЭРД, варьируемой от 10°К до 1000°К. Предполагалось, что усиление приемной антенны в направлении ЭРД равен 0 дБ, то есть она является изотропной или имеет соответствующий уровень боковых лепестков диаграммы направленности. Потери в приемном фидерном тракте и при распространении в ионизированной среде считались пренебрежительно малыми. Расстояние от ЭРД до приемной антенны в одном случае считалось равным расстоянию до измерительной антенны, то есть 0.8 м, а в другом – равнялось 5.3 м.

Рассмотрим влияние электромагнитного излучения ЭРД типа СПД-100-2 на деградацию отношения сигнал-шум на входе приемного тракта [14]. График, полученный на основе приведенных выше зависимостей и отражающий относительное ухудшение отношения сигнал-шум на входе приемного тракта для различных значений суммарной шумовой температуры системы T_0 , приведен на рисунке 5. Данная зависимость построена для диапазона частот 7.2 ГГц, выделенного для систем дальней космической связи. Видно, что отношение сигнал-шум при работающем ЭРД может ухудшаться на 2-8 дБ при начальной шумовой температуре системы от 100°К до 10°К. При этом максимальная дальность действия системы связи Земля-КА может уменьшиться на 1-4 дБ, то есть потенциально более чем в 2 раза.

На рисунке 6 приведены аналогичные зависимости деградации отношения сигнал-шум для случая, когда используется пакет из $M_{ЭРД}$ ЭРД. Видно, что в случае использования нескольких ЭРД ухудшение отношения сигнал-шум может быть весьма существенным. Так, для шумовой температуры системы в 100°К и напряжения разряда 800 В отношение сигнал-шум на максимальной дальности может ухудшиться на 5 дБ при 4 ЭРД и почти на 10 дБ при пакете из 16 ЭРД.

Зависимости, аналогичные приведенным на рисунках 5 и 6 для диапазона с центральной частотой 6.25 ГГц, соответствующего каналу спутниковой связи Земля-КА, приведены на рисунках 7 и 8. Видно, что этот диапазон характеризуется более высоким уровнем помех от ЭРД, что соответствует результатам экспериментальных измерений. Здесь для шумовой температуры системы 100°К уменьшение отношения сигнал-шум при одном ЭРД и напряжении разряда 800 В может составить 6 дБ и примерно 17 дБ для пакета из 16 ЭРД.

Одной из мер, позволяющей уменьшить влияние излучения ЭРД на системы связи, является увеличение расстояния от приемной антенны до ЭРД. Результаты расчетов для случая, когда расстояние до приемной антенны

составляет 5.3 м, приведены на рисунках 9, 10 и 11, 12. Соответственно для 7.2 ГГц и для 6.25 ГГц. Видно, что в этом случае влияние собственного излучения ЭРД может быть существенно уменьшено. Так, для диапазона 7.2 ГГц и шумовой температуры системы 100°К уменьшение отношения сигнал-шум для одного ЭРД составит максимум 0.05 дБ, а для пакета из двух ЭРД – 0.1 дБ. Для диапазона 6.25 ГГц и аналогичных условий уменьшение отношения сигнал-шум будет соответственно примерно 0.25 дБ и 0.5 дБ.

Аналогичные расчеты были проведены для ЭРД СПД-100-3 [14]. Измерения проводились для трех форм изоляторов, имитирующих различную степень выработки ресурса ЭРД. Соответствующие этим измерениям графики зависимости деградации отношения сигнал-шум представлены на рисунке 13 для расстояния до приемной антенны 0.8 м. Видно, что здесь при максимальной выработке ресурса (вариант 3) ухудшение отношения сигнал-шум может составить от 0.15 дБ при шумовой температуре системы 100°К до примерно 1.3 дБ при 10°К.

В то же время видно, что в случае использования нескольких ЭРД ухудшение отношения сигнал-шум может быть более существенным (рисунок 14). Так для шумовой температуры системы в 100°К и варианта 3 отношение сигнал-шум на максимальной дальности может ухудшиться на 0.5 дБ при 4-х ЭРД и почти на 2 дБ при пакете из 16-и ЭРД. В случае шумовой температуры системы 10°К данные значения составят соответственно 3.8 и 8 дБ.

Аналогичные зависимости для диапазона 6.5 ГГц приведены на рисунках 15 и 16. Видно, что уменьшение отношения сигнал-шум составит 0.5 дБ для одного ЭРД и примерно 4 дБ для пакета из 16-и ЭРД.

Зависимости для ЭРД СПД-100-3 [14] и расстояния до приемной антенны 5.3 м приведены на рисунках 17, 18 и 19, 20. Соответственно для 7.2 и 6.25 ГГц. Видно, что для данного расстояния влияние ЭРД будет существенно меньше и уменьшение отношения сигнал-шум составит примерно 0.004 дБ для одного

ЭРД и 0.0075 дБ для пакета из 2-х ЭРД для диапазона 7.2 ГГц и соответственно 0.01 дБ и 0.02 дБ для диапазона 6.25 ГГц.

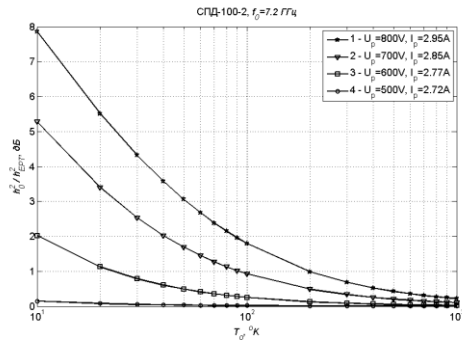


Рисунок 5

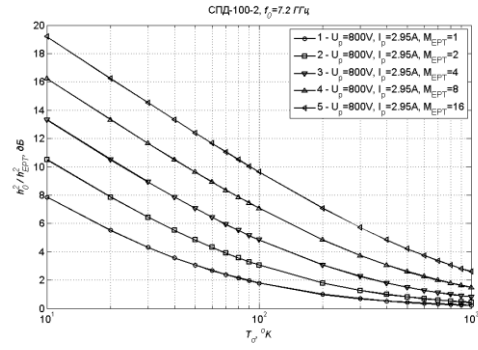


Рисунок 6

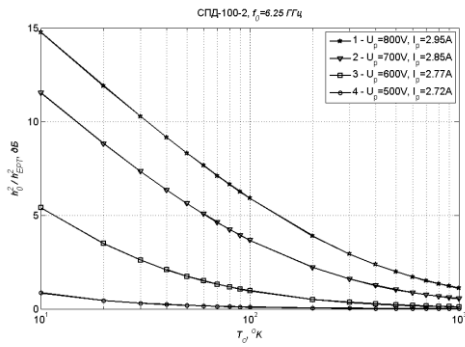


Рисунок 7

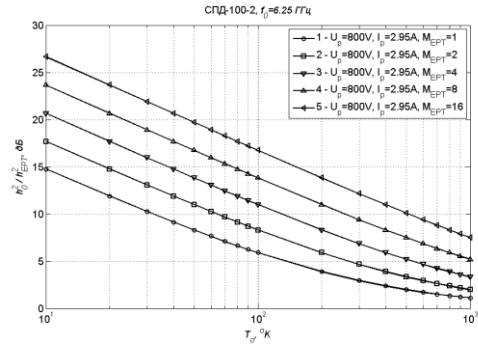


Рисунок 8

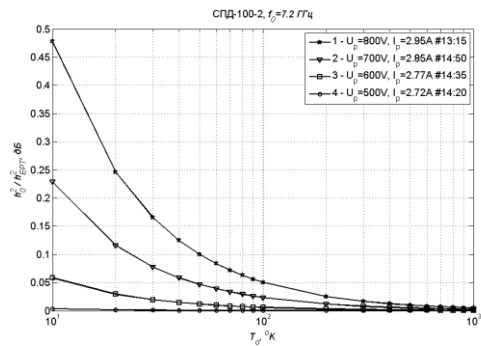


Рисунок 9

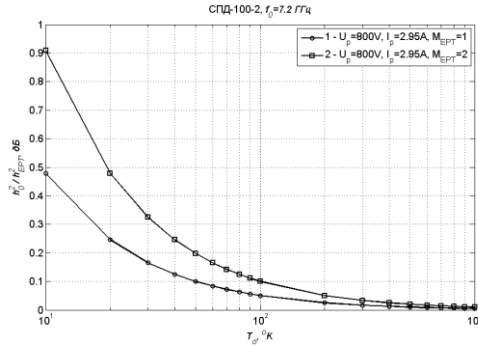


Рисунок 10

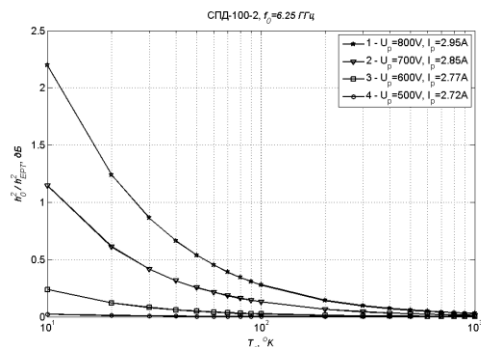


Рисунок 11

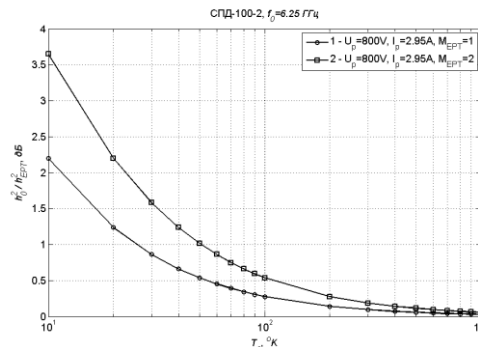


Рисунок 12

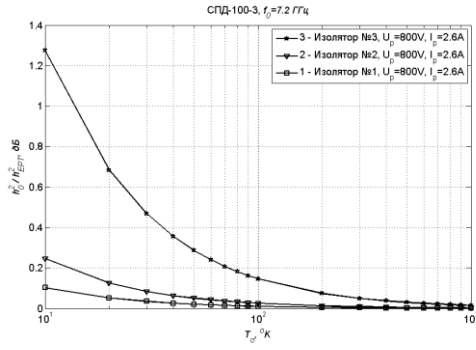


Рисунок 13

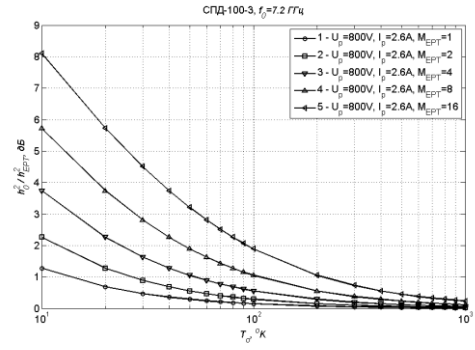


Рисунок 14

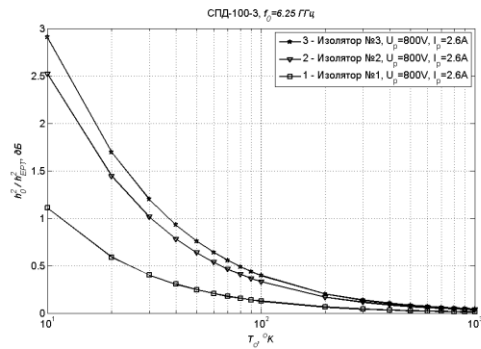


Рисунок 15

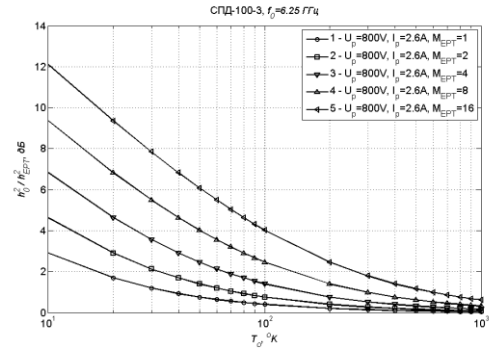


Рисунок 16

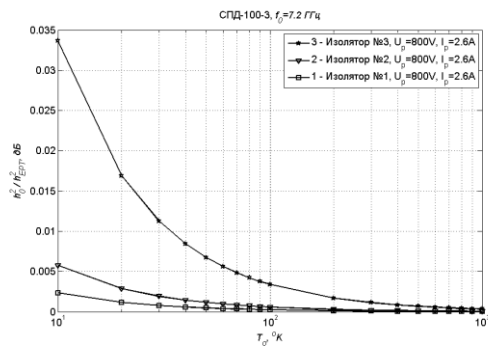


Рисунок 17

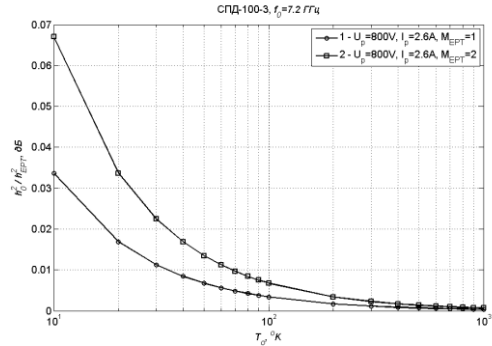


Рисунок 18

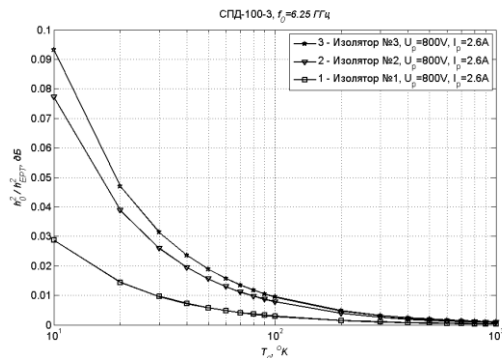


Рисунок 19

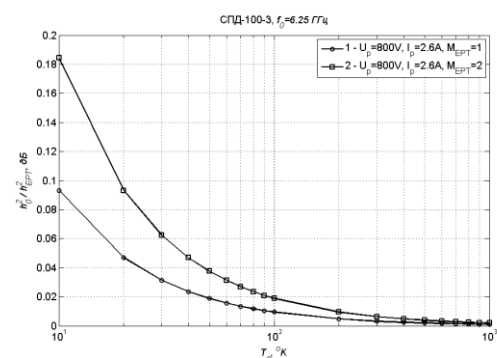


Рисунок 20

5. Заключение

Таким образом, собственное электромагнитное излучение СПД при определенных условиях может оказать существенное влияние на шумовые характеристики радиолинии космической связи.

Для обеспечения минимизации воздействия излучения СПД на системы космической связи необходимо:

- принимать меры по снижению уровня собственного электромагнитного излучения СПД в диапазоне частот работы радиолинии Земля-КА, например, путем выбора соответствующих режимов работы СПД;

- при разработке компоновки КА осуществлять максимально возможное пространственное разнесение СПД и приемных антенн систем связи; во многих случаях эффективным решением может оказаться принятие мер по экранированию приемной антенны от ЭРД или уменьшению уровня боковых лепестков диаграммы направленности приемной антенны в направлении ЭРД;

- при наличии возможности выбирать диапазон частот, используемый радиолинией Земля-КА, с учетом минимального уровня собственного электромагнитного излучения СПД в этом диапазоне.

6. Библиографический список

1. Sariato C.J., Sankovic J.M., Freitas J., Lynn P.R. "RHETT/EPDM Hall Thruster Propulsion System Electromagnetic Compatibility Evaluation", IEPC-97-108, 25th International Electric Propulsion Conference, Cleveland, Ohio, August 1997, pp. 675-682.

2. Manzella, D., Sarmiento, C., Sankovic., J., and Haag, T., "Performance Evaluation of the SPT-140," IEPC-97-059, 25 th International Electric Propulsion Conference, Cleveland, Ohio, August 1997, pp. 359-364.

3. Beiting E.J., Garrett M.L., Pollard J.P., Pezet B., Gouvernayre P. Spectral Characteristics of Radiated Emission from SPT-100 Hall Thrusters. The 29 th

International Electric Propulsion Conference (IEPC-2005-221), Princeton University, October 31 - November 4, 2005, 11 p.

4. Beiting E.J., Cohen R.B., Crofton M.W., Diamant K., James E. Pollard J.E., Qian J. Electric Thruster Test and Evaluation. Crosslink. The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. Fall 2005, Vol. 6 No. 3, pp. 23-30.

5. Beiting E.J., Garrett M.L., Pollard J.E. Spectral and Temporal Characteristics of Electromagnetic Emissions from the BPT-4000 Hall Thruster. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA-2006-5262, 15 p.

6. Beiting, E. J., "Design and Performance of a Facility to Measure Electromagnetic Emissions from Electric Satellite Thrusters," AIAA-2001-3344, 37 th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 8-11 July 2001, SaltLake City, Utah, 11 p.

7. Kirdyashev, K. P., "Electromagnetic Interference with Hall Thruster Operation," Proc. 4 th Int. Spacecraft Propulsion Conf. Cagliari, Sardinia, Italy 2-4 June 2004 (EAS SP-555, Oct. 2004), p. 44.1.

8. Важенин Н.А., Кочура С.Г., Максимов И.А., Малюгин Д.В., Надирадзе А.Б., Плохих А.П., Шапошников В.В. Спектрально-временные характеристики помех стационарных плазменных двигателей. Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности (ЭМС-2008), Санкт-Петербург, 24-26 сентября 2008 г., стр. 586-591.

9. Plokhikh A.P., Popov G.A., Shishkin G.G., Antropov N., Vazhenin N.A., Soganova G.V. Electromagnetic Safety of Spacecraft During Active Experiments with the Use of Plasma Accelerators and Ion Injectors. 37th COSPAR Scientific Assembly 2008, Montreal, Canada, 13-20 Jule, 2008, C52-0031-08, p. 2463.

10. А.П.Плохих, В.Ким, Н.А.Важенин, Е.К.Сидоренко. Исследование влияния режимов работы стационарных плазменных двигателей на их помехоэмиссию. "Технологии электромагнитной совместимости", №2(29), 2009г., стр.31-45. ISSN 1729-2670.
11. Plokhikh A.P., Antropov N., Vazhenin N.A., Popov G.A., Shishkin G.G., Soganova G.V. Electromagnetic Emission of Pulsed Plasma Thrusters. 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC Zurich 2009. 12-16 January 2009. ETH Zurich, Switzerland, pp. 21-24.
12. Важенин Н.А., Плохих А.П. Статистические характеристики помех стационарных плазменных двигателей. VIII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике РПД-2009, Москва, 8 - 11 декабря 2009 г., с. 24-28.
13. Важенин Н.А., Плохих А.П. ЭМС электрических двигателей космических аппаратов, предназначенных для исследования планет и малых тел солнечной системы. 9-й Международный симпозиум и выставка по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. ЭМС-2011. Санкт-Петербург, Россия, 13–16 сентября 2011, Труды симпозиума, стр. 491-494.
14. Plokhikh A.P., Vazhenin N. F., Kim V., Sidorenko E., Soganova G.V. Study for the Influence of Stationary Plasma Thruster Operating Modes on its Electromagnetic Emission. The 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011-094), Wiesbaden, Germany. September 11 – 15, 2011, pp. 256-258, (695p.)
15. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Soganova G.V. Methods for investigating the spectrum characteristics of emission for the plasma flows of artificial origin injected in the ionosphere of Earth. International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Australia, 9-13 July, 2001, v.5, pp. 2448-2450.
16. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Soganova G.V. Methods for Investigating the Influence of Self-Induced Electromagnetic Emission of Electric Propulsions Upon the

Sensitivity Characteristics of Onboard Radio Systems of Spacecrafts. 27-th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, USA, 15-17 October, 2001, 12 p.

17. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Volkovsky A.S., Soganova G.V. Sustainer Electric Propulsion System as a Risk Factor for Deep Space Radio Communications with Spacecraft. Proceedings of The Second World Space Congress, International Astronautical Federation (IAF), Houston, TH, USA, 10-19 October 2002, IAC-02-IAA.6.2.04, vol. 1, p. 336.

18. Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Soganova G.V. EMC problems on board the remote sensing and communications satellites equipped with electric propulsions. Proceedings of The Second World Space Congress, Committee on Space Research (COSPAR), Houston, TH, USA, 10-19 October 2002, vol. 34, p. 858.

19. Плохих А.П., Важенин Н.А., Соганова Г.В. Методы исследования влияния собственного электромагнитного излучения электрических ракетных двигателей на характеристики чувствительности бортовых радиотехнических систем КА. "Технологии электромагнитной совместимости", №3, 2002г., стр. 22-36.

20. А.П.Плохих, Н.А.Важенин. Анализ влияния электромагнитных помех электрических ракетных двигателей на характеристики чувствительности бортовых радиотехнических систем космических аппаратов в диапазоне сверхвысоких частот. Вестник Московского авиационного института 2004г. том. 11, N1, Издательство МАИ, стр. 81-93.

21. Плохих А.П., Важенин Н.А., Волковский А.С. Анализ влияния собственного излучения ЭРД на характеристики командной радиолинии системы дальней космической связи. Вестник Московского авиационного института, №1, 2007 г., том. 14, Издательство МАИ, стр. 55-70.

22. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения. М., 1987, 58 с.

23. IEEE Standard 161-1971 (reaffirmed 1980), "Standard definitions on electron tubes", 1980.
24. Jim Taylor, Michela Munoz Fernandez, Ana I. Bolea Alamanac, Kar-Ming Cheung. Deep Space 1 Telecommunications. DESCANSO Design and Performance Summary Series. Article 2. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, California, October 2001, 63 p.
25. Энергетические характеристики космических радиолиний. Под ред. О. А.Зенкевича. М. Авт.: Вимберг Г.П., Виноградов Ю.В., Зенкевич О.А., Лесниченко В.А., Митряев Е.В., Патрикеев Л.В., Титов Ю.М., Фомин А.Ф. Изд-во "Сов. радио", 1972, 436 с.