

04;09;12

О взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой электрореактивного двигателя

© К.П. Кирдяшев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

В окончательной редакции 23 июля 2002 г.

Представлены экспериментальные данные об усилении электромагнитного излучения в плазме электрореактивного двигателя. Выявлены условия аномального взаимодействия излучения с плазмой двигательной установки.

Проблема электромагнитной совместимости плазменных двигателей с системами космических аппаратов приобретает особое значение при проектировании спутников связи и обеспечении радиоэлектронными средствами космических аппаратов, предназначенных для изучения космического пространства и планет Солнечной системы. Взаимодействие электромагнитных полей, создаваемых бортовой радиоэлектронной аппаратурой, с плазмой двигательных установок приводит к изменению электромагнитной обстановки 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 приемно-передающих антенн [1–4]. Этими эффектами не ограничивается взаимодействие электромагнитных волн с плазмой электрореактивных двигателей.

В данной работе на основе результатов проведенных стендовых испытаний стационарного плазменного двигателя (СПД) установлен дополнительный фактор воздействия двигателя на электромагнитную обстановку вблизи космического аппарата, связанный с усилением внешнего электромагнитного излучения в плазме двигательной установки. Воздействие на плазму двигательной установки электромагнитных полей обусловлено различными элементами бортового радиотехнического комплекса (передающими СВЧ антеннами систем космической

радиосвязи, источниками паразитного излучения, возникающего при работе радиоэлектронной аппаратуры).

Эффект усиления электромагнитного излучения установлен при проведении предполетных стендовых испытаний тяговых модулей (типа СПД-70) двигательной установки космического аппарата „Ямал-100“ [5]. В исследованных режимах работы двигательной установки наблюдалось значительное увеличение интенсивности СВЧ поля, создаваемого внутри вакуумной камеры бортовым радиотехническим комплексом (рис. 1). Регистрация СВЧ поля при работе двигательной установки производилась с помощью измерительной СВЧ антенны в диапазоне частот сигнала гетеродина бортового приемника-ретранслятора. Изменение интенсивности поля, воздействующего на плазму двигательной установки, производилось введением ослабления сигнала гетеродина, выходящего из высокочастотного тракта приемника-ретранслятора. Обращает на себя внимание нестационарный характер поля вторичного излучения, которое представляется в виде последовательности интенсивных выбросов огибающей СВЧ поля с длительностью, не превышающей 1–10 мс. Переключение входа измерительного устройства на согласованную нагрузку и изменение режимов двигательной установки позволили исключить связь наблюдаемого эффекта с возможной наводкой сигнала в цепях измерительного устройства при работе бортового радиокомплекса и рассматривать усиление СВЧ поля внутри вакуумной камеры как результат взаимодействия внешнего излучения с плазмой двигательной установки. С учетом импульсного характера наблюдаемого вторичного излучения и сглаживающего действия измерительной аппаратуры на регистрируемые выбросы огибающей СВЧ поля коэффициент усиления электромагнитного излучения при работе двигательной установки достигает 30–35 дВ.

Детальное исследование условий эффективного взаимодействия СВЧ излучения с плазмой двигательной установки проведено с экспериментальной моделью СПД [6]. При проведении эксперимента обеспечивалась возможность смещения двигателя относительно излучающей антенны, при котором воздействие СВЧ излучения производилось на различные области выходящего плазменного потока и элементы конструкции двигателя. Измерения выполнены на отдельных частотах в диапазоне 2–4 GHz при изменении мощности источника излучения в пределах 10^{-6} – 10^{-2} W, соответствующих энергетическим параметрам электромагнитной обстановки вблизи космического аппарата. Регистра-

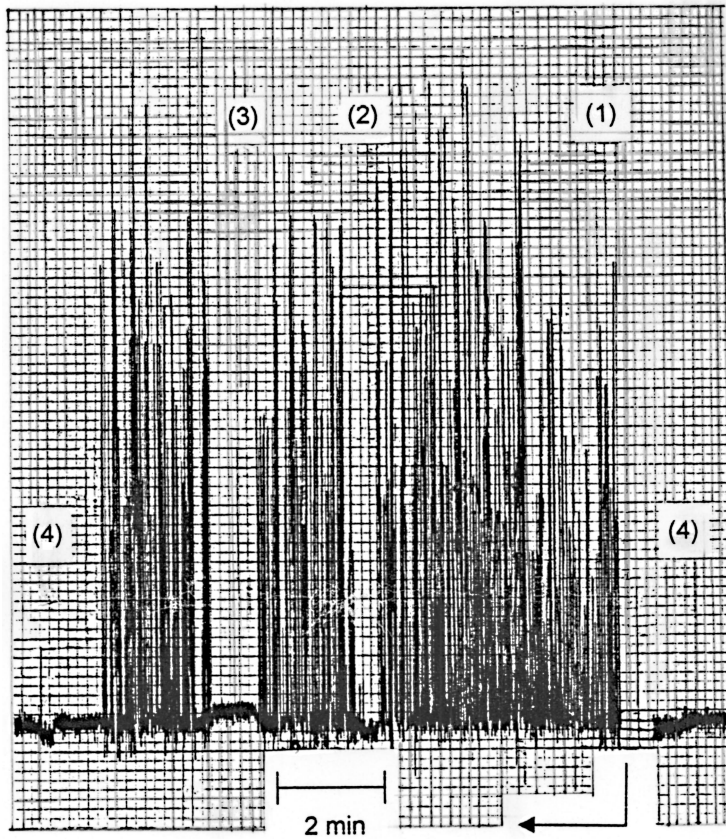


Рис. 1. Регистрограмма СВЧ сигнала с выхода измерительного приемника при различных режимах работы двигательной установки и бортового радиокомплекса: 1 и 2 — запуск и отключение двигательной установки; 3 — включение согласованной нагрузки на входе измерительного приемника; 4 — подавление паразитного сигнала гетеродина из входного тракта приемника-ретранслятора.

ция СВЧ поля внутри вакуумной камеры производилась в периферийной области плазменного потока с помощью двухпроводного СВЧ зонда с пространственным разрешением 1–1.5 мм. Одновременно производилась регистрация поля электромагнитного излучения широкополосной

СВЧ антенной, установленной с внешней стороны диэлектрического окна вакуумной камеры. Применение измерительных приемников с флуктуационной чувствительностью до 10^{-15} W/MHz позволяло провести необходимые калибровочные измерения по эталонному источнику СВЧ шумов [7] и сопоставить результаты измерений с интенсивностью СВЧ полей, обусловленных как внешним источником излучения, так и возбуждением собственных СВЧ колебаний в плазменном потоке.

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о наличии пороговых значений интенсивности СВЧ полей вблизи двигательной установки, при превышении которых проявляется эффект усиления внешнего излучения. При регистрации огибающей СВЧ излучения с временным разрешением порядка 1 с (рис. 2) коэффициент усиления СВЧ поля вблизи двигательной установки в исследованном диапазоне частот составляет 10–15 dB относительно интенсивности СВЧ поля при отключенной двигательной установке. Величина порога на 3–4 порядка превышает интенсивность поля, обусловленного собственными колебаниями плазмы в области катода-компенсатора. Эффект усиления в наибольшей степени проявляется при таком расположении излучающей антенны и двигательной установки, когда отсутствует экранирующее действие плазменного потока на прохождение электромагнитного излучения к элементам конструкции двигателя. При смещении двигателя относительно излучающей антенны (рис. 3) наблюдаются характерные зоны воздействия излучения на плазму двигательной установки — непосредственно на элементы конструкции двигателя (I зона), через центральную часть выходящего плазменного потока (II зона) и с его внешней стороны (III зона). При определении коэффициентов усиления в каждой из зон воздействия внешнего излучения производилось сопоставление плотности энергии СВЧ поля при отключении двигательной установки, что позволяло учесть влияние отражений СВЧ излучения от элементов конструкции двигателя на начальное распределение СВЧ поля. Характерно, что с увеличением частоты наблюдается возрастание интенсивности и уменьшение порога усиления, воздействующего на двигатель электромагнитного излучения.

Полученные экспериментальные данные не укладываются в рамки обычных представлений о взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой. Обоснование возможного механизма аномального взаимодействия СВЧ излучения с плазмой СПД необходимо для учета и возможного применения наблюдаемого эффекта при проектировании

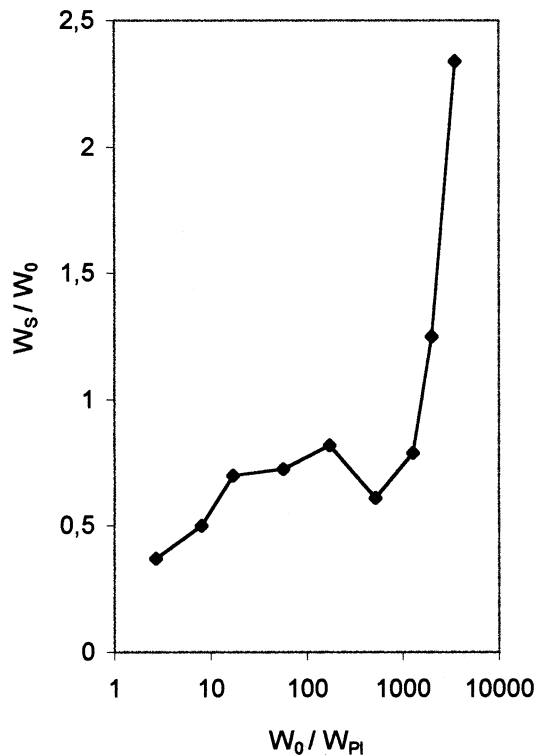


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления СВЧ поля вблизи двигательной установки W_s/W_0 от интенсивности внешнего электромагнитного излучения W_0/W_{P1} : W_{P1} — плотность энергии собственных СВЧ колебаний в катодной области плазменного потока.

радиосвязи с космическими аппаратами. При этом следует исходить из двух существенных обстоятельств, вытекающих из эксперимента. Во-первых, наблюдаемый эффект проявляется в диапазоне ленгмюровских частот электронов зоны нейтрализации ускоренного ионного потока. В соответствии с [8] эта зона является источником СВЧ колебаний, обусловленных развитием в плазменном потоке пучковой неустойчивости. В различных режимах работы СПД потенциал катода-компенсатора относительно плазменного потока составляет 20–35 В

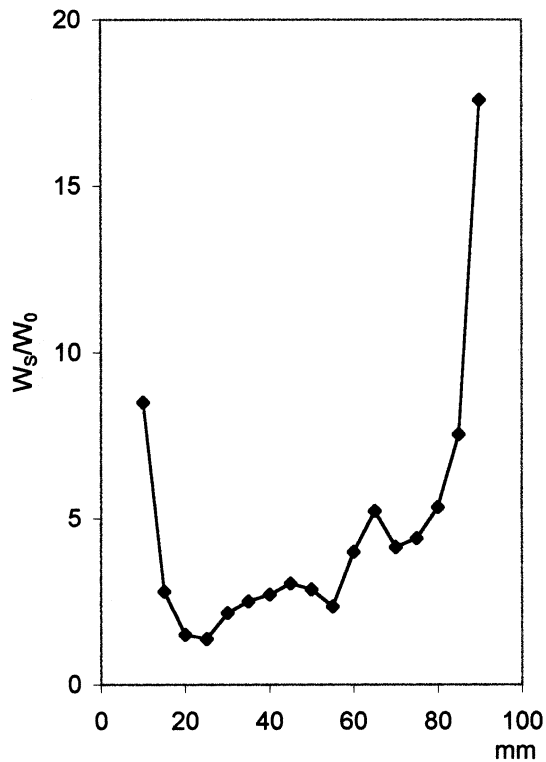


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления СВЧ поля W_s/W_0 от смещения излучающей антенны относительно среза двигательной установки. Зоны воздействия излучения: I зона — 0–20 mm; II зона — 20–80 mm; III зона — 80–100 mm.

при ускоряющем напряжении до 300–350 V. При этом скорость электронов, инжектируемых в ионный поток, составляет $(2.7–3.5) \cdot 10^8$ cm/s, что заметно превышает характерные значения тепловой скорости, $1.5 \cdot 10^8$ cm/s, при температуре электронов в зоне нейтрализации 5–7 eV [6]. Согласно экспериментальным данным и проведенным оценкам [9], относительная концентрация пучка быстрых электронов в зоне нейтрализации составляет $n_{eb}/n_{e0} \leq 0.1$ (здесь n_{e0} — концентрация медленных электронов в плазменном потоке).

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации СПД проявляется ограничение эмиссии электронов из катода-компенсатора, при котором существенно возрастают катодное падение потенциала и скорости инжектируемых в ионный поток электронов. В этих условиях развитие пучковой неустойчивости в плазме СПД носит нестационарный характер и наблюдаются значительные выбросы огибающей СВЧ излучения [5]. Такой же нестационарный характер свойственен полю вторичного СВЧ излучения, наблюдаемому в эксперименте (рис. 1).

Во-вторых, следует отметить существенную зависимость эффекта усиления от расположения излучающей СВЧ антенны относительно элементов конструкции СПД (рис. 3). При этом проявляется экранирующее действие плазменного потока на прохождение внешнего электромагнитного излучения к катоду-компенсатору. С увеличением частоты возрастает интенсивность вторичного излучения, что согласуется с уменьшением экранирующего действия плазменного потока на прохождение электромагнитного излучения. Это обстоятельство позволяет рассматривать возможность воздействия излучения на плазму СПД через наведенные на элементах конструкции установки СВЧ поля. Влияние наведенных полей на волновые процессы в плазме СПД наиболее существенно в области выхода электронов из катода-компенсатора. В этих условиях катод-компенсатор можно представить в виде приемной СВЧ антенны, нагруженной сопротивлением плазмы на выходе электронов из катода, емкостным сопротивлением приэлектродного слоя и эквивалентным волновым сопротивлением элементов конструкции двигателя. Интенсивность наведенного СВЧ поля зависит от соотношения размеров катода, воспринимающего электромагнитное излучение, и протяженности возмущаемой СВЧ полем области плазмы. При определенных условиях значительно возрастает по сравнению с флуктуационными полями интенсивность начальных возмущений, приводящих к модуляции скоростей электронов, инжектируемых в плазменный поток. В результате устанавливаются нарастающие во времени и в объеме плазменного потока СВЧ волны и двигательную установку можно рассматривать в качестве плазменного СВЧ усилителя.

Оценки усиления наведенных в плазме СПД полей могут быть получены на основе представлений о неустойчивости модулированного электронного пучка в плазме [10,11]. Представить достаточно строгую теорию взаимодействия электромагнитного излучения с плазмой СПД в настоящее время не представляется возможным ввиду сложности

учета совокупности факторов: распределения и ориентации составляющих полей излучения вблизи элементов конструкции космического аппарата, влияния металлической камеры при стендовых испытаниях СПД, неоднородной структуры плазменного потока, механизмов насыщения усиления наведенных СВЧ полей и последующего преобразования плазменных волн в электромагнитное излучение. При частоте воздействующей на плазму СПД электромагнитной волны, близкой к ленгмюровской частоте электронов ($\omega \approx \omega_{pe}$), можно пренебречь емкостным сопротивлением приэлектродного слоя и эквивалентным волновым сопротивлением элементов конструкции двигателя. В этом случае условие проявления эффекта усиления излучения в плазме СПД можно представить в виде:

$$(1/8\pi)(1 - R_A)(S_A/\Delta S_{Pl})(c/\Delta l_{Pl}v_e)W_0 > W_{Te},$$

в котором R_A — коэффициент отражения падающей электромагнитной волны от радиоприемной части катода-компенсатора с эффективной площадью S_A , W_0 — плотность энергии волны, ΔS_{Pl} и Δl_{Pl} — площадь поперечного сечения и линейный размер области возбуждения СВЧ поля в плазме, v_e — эффективная частота электронных столкновений, W_{Te} — плотность энергии тепловых плазменных колебаний, в области частот $\omega \approx \omega_{pe}$ [12] $W_{Te} \approx (1/12\pi^2)(kT_e/r_{De}^3)$, T_e и r_{De} — температура и дебаевский радиус электронов в прикатодной области плазменного потока. Пороговый характер усиления излучения и условия его проявления при воздействии излучения на элементы конструкции СПД качественно подтверждаются результатами проведенного эксперимента (рис. 2).

Усиление наведенных СВЧ полей в плазме СПД можно оценить на основе линейной теории при ограниченности времени взаимодействия электронного пучка с неоднородной плазмой [13]. Соответствующие оценки показывают, что для параметров электронного компонента плазмы двигательной установки коэффициент усиления наведенных СВЧ полей, локализованных в области катода-компенсатора, достигает 50–60 дВ. При эффективности преобразования усиленных плазменных волн в электромагнитные 10^{-3} – 10^{-2} [7] следует рассматривать преобладающий вклад вторичного СВЧ излучения в электромагнитную обстановку вблизи космического аппарата. Возникающие при этом эффекты могут сопровождаться амплитудными, фазовыми и частотными искажениями сигналов в радиоканалах, а также взаимными помехами в

бортовых приемно-передающих устройствах спутников связи. Особое значение проведенное исследование приобретает в связи с оценкой возможности использования на космических аппаратах плазменных устройств в качестве излучающих СВЧ антенн.

Автор выражает благодарность А.И. Морозову, А.И. Бугровой и А.И. Ефимову, принявшим участие в обсуждении полученных результатов, а также В.Л. Зарембо и А.В. Десяткову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Sovey J.S., Carney L.M., Knowles S.C.* // J. Propulsion. 1989. V. 5. N 5. P. 534–547.
- [2] *Ohler S.G., Ruffin A.B., Gichrist B.E.* et al. // 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Lake Buena Vista, FL. 1996. AIAA 96–2706.
- [3] *Shishkin G.G.* // II German-Russian Conf. On Electric Propulsion Engines and Their Technical Applications. M., 1993. P. 111.
- [4] *Козлов И.П.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 71–78.
- [5] *Кирдяшев К.П., Ефимов А.И., Лукин Д.С.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 3. С. 80–87.
- [6] *Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В.* и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [7] *Кирдяшев К.П.* Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [8] *Кирдяшев К.П., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.
- [9] *Morozov A.I., Savelyev V.V.* Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory. In Reviews of Plasma Physics / Ed. by V.B. Kadomtsev (deceased) and V.D. Shafranov. V. 21. N.Y.: Consultants Bureau, 2000. P. 203–391.
- [10] *Березин А.К., Березина Г.П., Болотин Л.И.* и др. // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. В. 4. Киев: Наук. думка, 1965. С. 129–143.
- [11] *Бернашевский Г.А., Богданов Е.В., Кислов В.Я.* и др. Плазменные и электронные усилители и генераторы СВЧ / Под ред. З.С. Чернова. М.: Сов. радио, 1965. С. 96.
- [12] *Бекефи Дж.* Радиационные процессы в плазме / Пер. с англ. М.: Мир, 1971. С. 437.
- [13] *Брейзман Д.Д., Рюттов Д.Д.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. № 4 (10). С. 1401–1410.