

04;09;12

Аномальное СВЧ излучение стационарного плазменного двигателя

© К.П. Кирдяшев, А.И. Ефимов, Д.С. Лукин

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино
Московский физико-технический институт
(государственный технический университет), Долгопрудный

Поступило в Редакцию 18 сентября 2001 г.

Представлены результаты предполетных радиотехнических испытаний тяговых модулей объединенной двигательной установки космического аппарата "Ямал-100". Выявлена импульсная составляющая электромагнитного излучения, связанная с неустановившимися процессами эмиссии электронов из плазмы полого катода-компенсатора.

Применение стационарных плазменных двигателей (СПД) на геостационарном спутнике связи "Ямал-100" [1] на этапе предполетной подготовки потребовало определения возможного вклада СПД в формирование электромагнитной обстановки вблизи космического аппарата и оценки помехоустойчивости приемных каналов бортового радиокomплекса. Источники СВЧ колебаний и электромагнитного излучения СПД на частотах систем космической радиосвязи сосредоточены в зоне ионизации ускорительного канала, в пристеночных областях и в зоне нейтрализации выходящего плазменного потока [2–3]. При проведении радиотехнических испытаний СПД выявлена импульсная составляющая СВЧ излучения, приводящая к выбросам шумового фона, сопоставимым с величиной сигнала на входе приемных каналов бортового радиокomплекса. При передаче на космический аппарат цифровой информации и последующей ретрансляции принимаемых сигналов наличие импульсной составляющей СВЧ излучения двигательной установки представляет наибольшую опасность для помехоустойчивости бортовых радиоприемных устройств.

Для изучения этого вопроса нами был поставлен эксперимент на стендовой установке Ракетно-космической корпорации (РКК) "Энергия" с использованием натуральных образцов СПД, устанавливаемых на космическом аппарате. Проведены испытания отдельных модулей

двигательной установки на основе разработанной в ОКБ "Факел" модели СПД-70 в номинальном эксплуатационном режиме [1]. В настоящей работе были исследованы условия и возможные механизмы возбуждения импульсной аддитивной помехи в каналах космической радиосвязи и обоснован выбор режимов СПД, обеспечивающих электромагнитную совместимость двигательной установки с бортовым радиокомплексом. Результаты проведенных исследований имеют особое значение для проектирования космических аппаратов, предназначенных для межпланетных космических полетов с относительно низким энергетическим потенциалом радиолиний [4].

По результатам проведенных испытаний выявлены энергетические и временные характеристики СВЧ излучения СПД в диапазоне частот 5.7–6.2 GHz, соответствующих частотам приемных каналов ретранслятора. Регистрация возникающих при работе СПД радиопомех производилась как с выхода приемника бортового ретранслятора, так и с помощью стандартных измерительных приемников. Для контроля электромагнитной обстановки в спектре частот собственного СВЧ излучения СПД одновременно производились измерения интенсивности шумов в диапазонах 2.0–2.3 и 13–14 GHz. Применение приемного устройства бортового радиокомплекса позволило выявить вариации шумового излучения СПД с временным разрешением до $1 \mu\text{s}$, существенные для передачи цифровой информации. Регистрация возможных изменений электромагнитной обстановки на интервалах времени до 2 h производилась с помощью измерительных приемников с постоянной времени на выходе порядка 0.1 s. Это привело к необходимости учета сглаживающего действия измерительного устройства на амплитуду выбросов излучения при оценке интенсивности импульсной составляющей СВЧ излучения. Такой учет производился по полосе пропускания приемников на низкой частоте при определенной длительности и частоте следования выбросов излучения. Оценка абсолютных значений спектральной плотности электромагнитного излучения СПД производилась на основе разработанной методики калибровочных измерений по эталонному газоразрядному источнику шума [3].

При выполнении данного эксперимента установлено, что существуют различные временные масштабы нестационарности процессов, ответственных за генерацию СВЧ колебаний и помеховое электромагнитное излучение СПД. В микросекундной области огибающая СВЧ излучения представляется в виде ограниченного числа импульсов длительностью до $1.5\text{--}2 \mu\text{s}$ при характерном периоде их следования в пределах $10\text{--}15 \mu\text{s}$

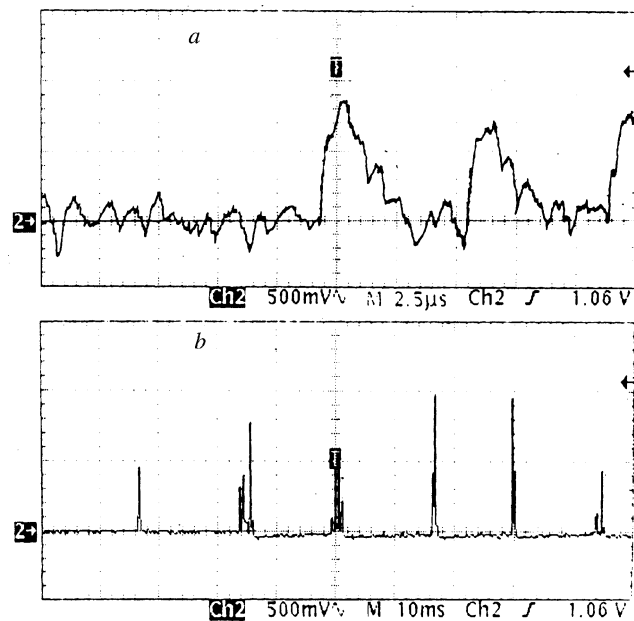


Рис. 1. Огибающие помехового СВЧ излучения СПД на различных временных интервалах: *a* — $25 \mu\text{s}$, *b* — 100ms (регистрация сигнала на цифровом осциллографе с выхода приемника бортового радиокомплекса); *c* — 7.5min (выходной сигнал измерительного приемника на аналоговом регистраторе), стрелкой обозначен момент включения двигательной установки, интенсивность СВЧ поля в вакуумной камере экспериментальной установки до (1) и после включения (2) тягового модуля.

(рис. 1, *a*). Следует отметить, что возбуждение СВЧ колебаний проявляется в режимах с ограниченной эмиссией электронов и малым расходом газа в полом катод-компенсаторе. Одной из причин ограничения эмиссии электронов в катод является наличие на поверхности эмиттера окисной пленки, появление которой вызвано неблагоприятными технологическими и предполетными условиями хранения катодов. Наличие таких пленок препятствует эмиссии электронов с поверхности эмиттера в полость катода, что приводит к увеличению катодного падения потенциала и кратковременным выбросам тока, 2–5 раз превышающим номинальные значения. При этом возможны срывы режимов разряда

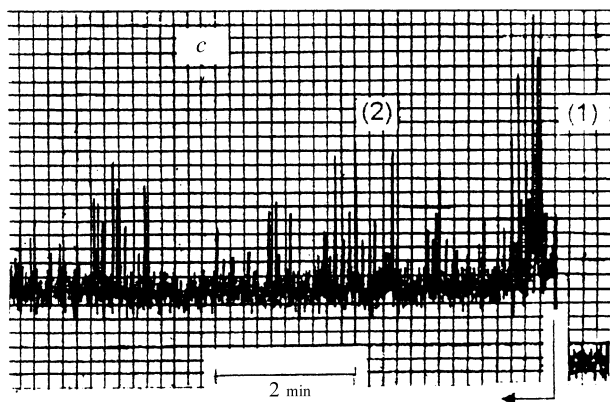


Рис. 1 (продолжение).

в ускорительном канале, требующие повторного включения СПД в соответствии с техническими условиями на эксплуатацию двигательной установки.

Характерно, что появление группы импульсов СВЧ излучения носит почти периодический характер с интервалом 10–20 мс (рис. 1, б), что соответствует периоду переменного тока нагревателя катода. Наблюдаемая периодичность следования импульсов СВЧ излучения согласуется с известным представлением о влиянии магнитного поля нагревателя на эмиссию электронов из области катода (см., например, [5]), когда магнитное поле нагревателя препятствует эмиссии электронов в плазменное образование и генерация СВЧ излучения проявляется в ”нулях” магнитного поля нагревателя. Действительно, при имеющихся место значениях тока нагревателя катода 10–12 А и ускоряющем электроны среднем катодном падении потенциала 20–30 В амплитудное значение индукции магнитного поля на оси спирального нагревателя достигает 0.005 Т и ларморовский радиус электронов составляет около 2.5 мм, что соответствует размерам плазменного образования вблизи выходного отверстия катода. Этим определяется возможный эффект ”запирания” электронов в области катода магнитным полем нагревателя и ограниченность во времени наблюдаемых при испытаниях СПД интенсивных выбросов СВЧ излучения.

Обращает на себя внимание наличие импульсной составляющей СВЧ излучения на фоне стационарной составляющей, обусловленной

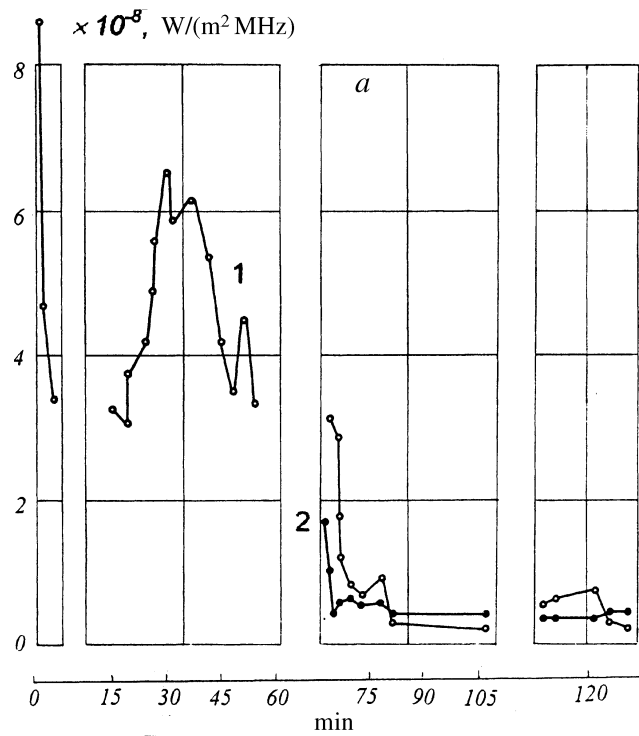


Рис. 2. Зависимости интенсивности импульсной (1) и стационарной (2) составляющих СВЧ излучения от длительности начального этапа испытаний СПД на частотах: 5.98 GHz (a), 2.11 GHz (b) и 13.5 GHz (c).

равновесным излучением выходящего из ускорительного канала СПД плазменного потока (рис. 1, c). Нестационарный характер излучения ранее отмечался при длительных испытаниях СПД [6], в данной работе этот эффект проявляется на начальных этапах испытаний длительностью до 2 h в различной степени для катодов, используемых в конструкции тяговых модулей. По истечении указанного времени прекращается генерация импульсной шумовой помехи (рис. 2) и режим работы СПД становится благоприятным для функционирования бортового радиокomплекса. Однако и при последующих включениях двигательной установки наблюдаются выбросы СВЧ излучения, что наиболее характерно для диапазона 13–14 GHz.

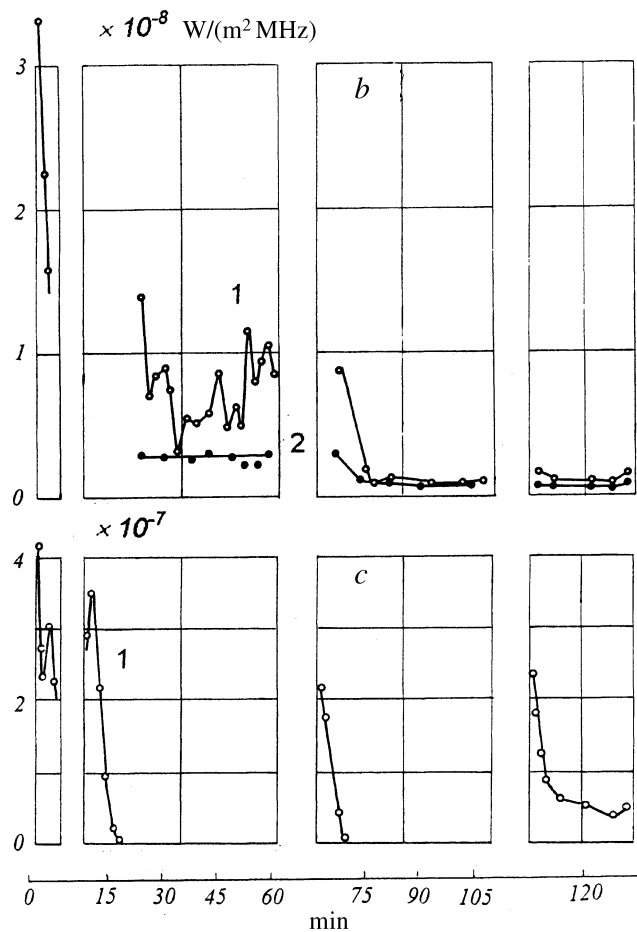


Рис. 2 (продолжение).

Как видно из результатов измерений, интенсивность импульсной составляющей СВЧ излучения на 6–7 порядков превышает равновесный уровень, что свидетельствует о развитии в плазме СПД пучковой неустойчивости с возможными для этой неустойчивости нелинейными эффектами. Представляется разумным рассматривать в качестве источника СВЧ излучения в исследованных режимах двигательной установки плазменное образование, локализованное вблизи выходного отверстия

полого катода. Об этом свидетельствуют следующие экспериментальные факты, выявленные при проведении испытаний СПД. Частоты регистрируемых по электромагнитному излучению СВЧ колебаний существенно перекрывают диапазон частот ленгмюровских колебаний в ускорительном канале и выходящем плазменном потоке. Исходя из величины разрядного тока, размеров выходного отверстия катода и катодного падения потенциала 20–30 В, оценим концентрацию электронов на выходе из полого катода величинами 10^{12} – 10^{13} см⁻³, что соответствует возможным значениям критической концентрации электронов для диапазона частот экспериментально наблюдаемого СВЧ излучения.

Энергетические и временные характеристики импульсной составляющей СВЧ излучения согласуются с представлением о нелинейной стадии развивающейся в области катода пучковой неустойчивости и срыве возбуждения колебаний на интервалах времени, соответствующих частоте кулоновских столкновений. При этом следует исходить из известной картины развития пучковой неустойчивости плазмы с электронным током, сопровождающейся процессом "термализации" энергии плазменных колебаний [7–8], который является результатом нелинейных эффектов, приводящих к трансформации продольных колебаний в поперечные и быстрому перемешиванию их фаз. Очевидно, что указанный процесс проходит наиболее интенсивно вблизи "нулей" магнитного поля, создаваемого нагревателем катода. Как известно, развитие неустойчивости, в результате которого энергия плазменных колебаний достигает уровня первоначальной энергии ускоренных электронов, происходит в течение десятков-сотен периодов колебаний. Возможность развития такой неустойчивости в выходной области плазмы полого катода следует из значительного превышения напряженностью электрического поля критического значения [9]: $E_D \approx 4.5 \cdot 10^{-12}(n_e/T_e)$, составляющего не более 10 В/см. Для оценки напряженности поля в режимах с ограниченной эмиссией электронов в полости катода можно рассматривать предельный случай, когда основное падение потенциала сосредоточено в области с размерами порядка ларморовского радиуса электронов в магнитном поле нагревателя. Полагая индукцию магнитного поля ≤ 0.001 Т, при которой электроны могут инжектироваться в плазменный поток, оценим напряженность электрического поля в катодной области значениями 100–500 В/см, что существенно превышает критическое поле. В соответствии с [9] длительность процесса ускорения электронов характеризуется временем между последовательными столкновениями электронов с ионами и составляет 5×10^{-6} – 10^{-5} с. Этим временем опре-

деляется и период следования импульсов СВЧ излучения вблизи "нулей" магнитного поля. Заметим, что в условиях формирования плазменного образования на выходе из катода электронно-ионные столкновения определяют характерные времена процесса развития неустойчивости плазмы, поскольку отношение эффективных частот электронно-ионных столкновений и столкновений электронов с нейтральными частицами $v_{ei}/v_{em} \sim 10^{-2} T_e^2 (n_e/n_m) \geq 10$ (здесь n_e и n_m — концентрации электронов и нейтральных частиц на выходе из катода).

Работа поддержана ОАО "Газком" и РКК "Энергия".

Авторы выражают благодарность Н.Н. Севастьянову и А.В. Шестакову за постановку задачи и внимание к работе, В.А. Белову, В.А. Блинову, В.Е. Вишнекову, А.Г. Орлову, И.В. Смирнову, И.А. Фролову и всем сотрудникам РКК "Энергия", принявшим участие в организации и проведении испытаний. Авторы признательны А.И. Морозову за полезное обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] *Popov G., Kim V., Murashko V., Semenov Yu.* et al. // Proceedings of the 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion. Cannes, 10–13 October 2000. ESA SP-2000. P. 21–26.
- [2] *Кирдяшев К.П., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.
- [3] *Кирдяшев К.П.* Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [4] *Кирдяшев К.П.* // Радиотехника. 1998. № 8. С. 70–77.
- [5] *Морозов А.И., Кирдяшев К.П., Бугрова А.И.* и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 7. С. 620–629.
- [6] *Брухтий В.И., Кирдяшев К.П., Зарембо В.И.* и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 2. С. 68–73.
- [7] *Фанченко С.Д., Демидов Б.А., Елагин Н.И.* и др. // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. № 2. С. 497–500.
- [8] *Сухомлин Е.А., Супруненко В.А., Рева Н.И.* и др. // Сб. сер. "Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза". Высокочастотные свойства плазмы. 1965. С. 126–133.
- [9] *Drieser H.* // Phys. Rev. 1960. V. 117. N 2. P. 329–338.