

04;12

Стационарные режимы турбулентного ускорения плазмы в сильноточном магнитоплазгодинамическом двигателе

© К.П. Кирдяшев, В.И. Брухтий

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино
E-mail: kpk114@ire216.msk.su

Поступило в Редакцию 25 декабря 2000 г.

Установлена устойчивая связь электрореактивных параметров сильноточного магнитоплазгодинамического двигателя с интенсивностью СВЧ излучения и спектрами низкочастотных колебаний. Показано, что реализация стационарных режимов турбулентного ускорения плазмы ограничена возбуждением крупномасштабной ионно-звуковой турбулентности плазменного потока.

Перспективы применения магнитоплазгодинамических (МДП) двигателей в качестве перспективных маршевых двигателей космических аппаратов связаны с созданием высокоскоростных плазменных потоков и реализацией предельных режимов ускорения плазмы. Установлено [1–3], что в предельных режимах проявляются неустойчивости, приводящие к возбуждению в ускоряющей области плазмы и выходящем плазменном потоке различных типов колебаний. Эти процессы сопровождаются турбулентным нагревом плазмы анодного слоя и ее ускорением в результате электронно-ионного трения при возбуждении СВЧ колебаний [4]. В стационарных режимах МПД двигателей с внешним магнитным полем действие турбулентного механизма ускорения плазмы ограничено аномальным тепловыделением на аноде, в наибольшей степени проявляющемся в предельных режимах двигательной установки. Турбулентные эффекты в импульсных плазменных двигателях позволяют рассматривать формирование ускоряющего токового слоя плазмы в виде "электротермического взрыва" со значительным ростом температуры электронов и ионов в процессе развития токовой неустойчивости плазмы [5–6]. В данной работе исследованы условия, ограничивающие действие турбулентного механизма ускорения плазмы в стационарных режимах сильноточного МПД двигателя, и установлена

связь тяговой эффективности двигательной установки с интенсивностью СВЧ излучения и спектрами колебаний в плазменном потоке.

Исследования проводились на экспериментальных моделях силовоточного МПД двигателя с различной конфигурацией анода при изменении эксплуатационных параметров двигательной установки по напряжению, разрядному току и расходу рабочего вещества (лития). Испытания двигательной установки проведены в стационарных режимах разряда при напряжении 25–60 В, разрядном токе 2000–4500 А и массовом расходе рабочего вещества в пределах 0.05–0.1 г/с. В этих режимах концентрация электронов в центральной части выходящего плазменного потока по данным зондовых измерений составляла $(1–5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ при температуре электронов в пределах (2–5) эВ. Предельные режимы реализованы в высоковольтной области вольт-амперных характеристик разряда при значительных токах ”выноса” за срез анода двигательной установки. В этих режимах электрический разряд характеризовался формированием внешней ускоряющей области плазмы, в которой концентрация электронов изменялась в пределах $(3 \cdot 10^{11}–10^{12}) \text{ cm}^{-3}$.

В предельных режимах значительная часть приложенного напряжения приходится на внешнюю область разряда, в которой вследствие развития пучковой неустойчивости возбуждаются ленгмюровские колебания, регистрируемые по электромагнитному излучению плазмы в диапазоне частот 1–10 GHz. С использованием данных зондовых измерений температуры электронов определена интенсивность тепловой составляющей излучения и по превышению интенсивности регистрируемых в эксперименте СВЧ полей теплового уровня выделены зоны генерации ленгмюровских колебаний на различных участках вольт-амперной характеристики разряда. Для регистрации колебаний в диапазоне частот 20–500 kHz, связанных с неустойчивостью динамики ионов в выходящем плазменном потоке, использованы электрические зонды, смещенные по углу в сечении примыкающей к аноду части плазменного потока и по его длине, что позволило определить спектры и пространственную структуру колебаний на различных участках вольт-амперных характеристик разряда. Одновременно производилась регистрация тяги двигательной установки и с учетом массового расхода рабочего вещества определены значения тяговой эффективности и скорости ионов лития в плазменном потоке в соответствии с методикой, описанной в [4].

Проведенные испытания позволили выделить отдельные участки на вольт-амперных характеристиках двигательной установки с различными

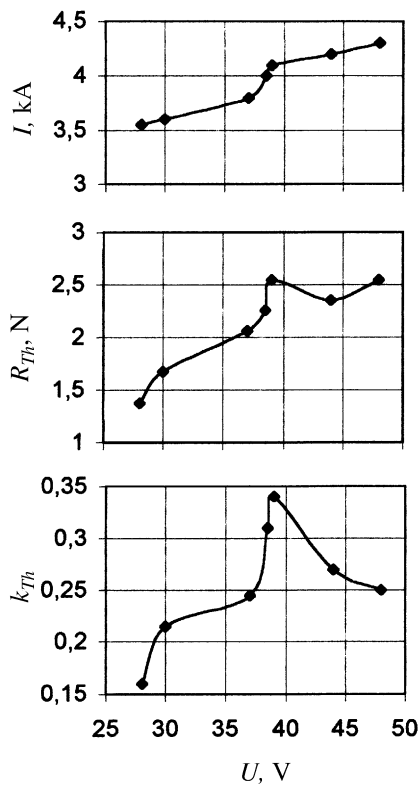


Рис. 1. Электрореактивные параметры МПД двигателя на различных участках вольт-амперной характеристики разряда.

зависимостями от напряжения таких электрореактивных параметров, как разрядный ток, тяга, создаваемая плазменным потоком, и тяговая эффективность (рис. 1). Выделенные участки соответствуют значениям разрядного напряжения 25–35 В (I), 35–40 В (II) и 40–60 В (III). На участке I реализуется режим формирования слаботурбулентного плазменного потока со спектром низкочастотных колебаний, монотонно спадающих по частоте до 300–400 кГц (рис. 2, *a, b*). Значения тяги двигательной установки R_{Th} согласуются с известной зависимостью этого параметра от разрядного тока I_0 : $R_{Th}(I) \approx k_{Th} I_0^2$, в которой тяговый

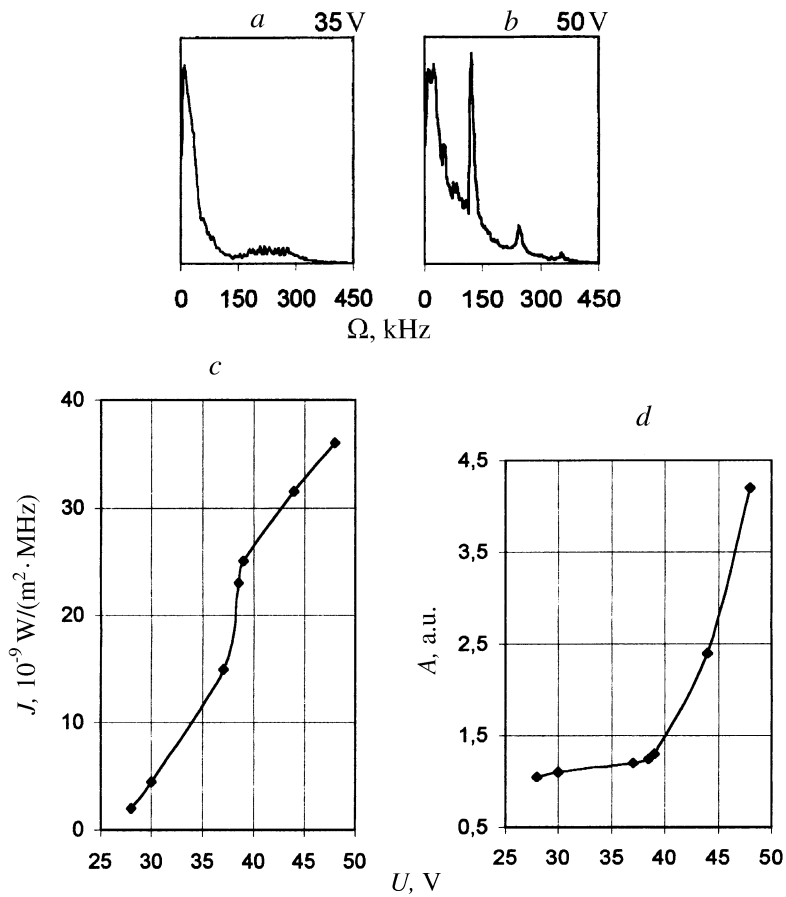


Рис. 2. Зависимости интенсивности СВЧ излучения и амплитуды низкочастотных колебаний потенциала плазмы от разрядного напряжения.

коэффициент k_{Th} составляет $(3.5-4) \cdot 10^{-3} \text{ N/A}^2$. При этом средняя скорость ионов в плазменном потоке $\sim 10^4 \text{ m/s}$ при тяговой эффективности двигательной установки 0.2–0.25. На низковольтном участке характеристики интенсивность СВЧ излучения (y) максимальна на частоте 3 GHz и изменяется в пределах $(10^{-9}-10^{-8}) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{MHz})$ (рис. 2, c). Эти

значения несущественно превышают равновесный уровень интенсивности излучения, составляющий по оценкам ($6 \cdot 10^{-10} - 10^{-9}$) $W/(m^2 \cdot MHz)$ при температуре электронов в выходящем пламенном потоке (3–5) eV. Степень возбуждаемой в разряде ленгмюровской турбулентности, определяемой по величине объемной плотности энергии СВЧ колебаний $W_{pe}/n_e T_e$ с учетом возможных значений коэффициента преобразования плазменных волн в электромагнитные, составляет $10^{-4} - 10^{-3}$.

С увеличением разрядного напряжения на участке II вольт-амперной характеристики наблюдается переход в режим интенсивного СВЧ излучения, соответствующий ленгмюровской турбулентности ускоряющей области плазмы с заметным возрастанием тяговой эффективности двигательной установки до значений 0.35–0.4. Соответствующее этому участку возрастание разрядного тока объясняется двукратной ионизацией атомов лития в разряде, с чем связано изменение спектра оптического излучения плазменного потока с появлением в нем спектральной линии 548.47 nm, соответствующей энергетическому переходу $2s^3S - 2p^3P^0$ для возбужденного иона лития (верхний и нижний энергетические уровни перехода 61.28 и 59.02 eV). Наблюдаемое при этом интенсивное СВЧ излучение позволяет считать, что оптический спектр сильноточного разряда содержит составляющие, обусловленные возбуждением ионов лития ускоренными в СВЧ полях электронами в процессе развития в плазме ленгмюровской турбулентности [1].

Возрастание тяговой эффективности двигательной установки с увеличением интенсивности СВЧ колебаний указывает на проявление механизма турбулентного ускорения плазмы, ранее установленного в МПД двигателях с внешним магнитным полем [4]. Однако для сильноточного двигателя такой режим ускорения плазмы реализуется в ограниченной области изменения разрядного напряжения. С превышением 45 V (участок III вольт-амперной характеристики с ограничением роста разрядного тока с напряжением) тяговая эффективность двигательной установки существенно снижается и не превышает 0.25, хотя при этом значительно возрастает интенсивность СВЧ колебаний.

Из результатов регистрации колебаний потенциала в выходящем плазменном потоке (рис. 2, d) следует, что именно низкочастотные колебания ответственны за снижение тяговой эффективности двигательной установки. Причем, что весьма важно, проявление этого эффекта связано с возбуждением дискретных мод в спектрах колебаний, соответствующих гармоникам частоты 120–140 kHz. Возбуждаемые в высоковольтных режимах разряда дискретные составляющие соответствуют

крупномасштабным возмущениям потенциала плазмы в объеме разряда. Подтверждением этого являются такие экспериментальные факты, как значительные выбросы напряжения на аноде, превышающие напряжение источника электропитания, заметная корреляция в колебаниях потенциала зондов, смещенных по сечению и длине выходящего плазменного потока. В этих условиях проявляется нестационарная картина разряда с характерными срывами ускорительных режимов и пульсациями плотности выходящего плазменного потока, что и приводит к снижению тяговой эффективности двигательной установки.

Рассмотрим возможные механизмы возбуждения крупномасштабных составляющих низкочастотных колебаний, ограничивающих эффективность действия двигательной установки в предельных режимах. Прежде всего это токовая неустойчивость разрядной области плазмы, приводящая к возбуждению ионно-звуковых колебаний при соотношении температур электронов и ионов в плазме $T_e \gg T_i$. Спектр низкочастотных колебаний согласуется с представлением частоты в виде $\Omega = k_m v_S$ для дискретных мод колебаний с $k_m = m/L$, здесь $v_S = (T_e/m_i)^{1/2}$ — скорость ионного звука, L — размер внутренней области разряда. Действительно, при имеющих место в эксперименте параметрах плазмы скорость ионного звука составляет $(3-5) \cdot 10^3$ м/с и для $L \sim 0.1$ м дискретные моды колебаний потенциала плазмы в разряде проявляются на гармониках частоты, наблюдаемой в эксперименте. Отметим, что влияние крупномасштабных мод колебаний на эффективность ускорительных режимов в наибольшей степени проявляется для сильноточных двигателей, характеризующихся значительными размерами разрядной области по сравнению с другими типами двигателей. Это следует из представления спектральной функции ионно-звуковой турбулентности плазмы с электронным током [7] в виде $S(k) \sim \sqrt{\ln(1/kr_D)}/k^3$, когда энергия колебаний сосредоточена в области низких частот вблизи нижней границы устойчивости.

Другой возможной причиной перехода разряда в режим развитой низкочастотной турбулентности является неустойчивость пучка быстрых ионов в ускоряющей области плазменного потока. При концентрации быстрых ионов $n_{i1} \ll n_{i0}$ (n_{i0} — концентрация медленных ионов, образующихся в результате ионизационных столкновений), инкремент неустойчивости $\gamma_i \sim \omega_{pi}(n_{i1}/n_{i0})^{1/3}$ по порядку величины составляет 10^5 , что позволяет рассматривать возбуждение низкочастотных колебаний на временных интервалах, соответствующих пролетному времени ионов в ускоряющей области плазмы.

При возбуждении интенсивных СВЧ колебаний в высоковольтной области вольт-амперной характеристики необходимо оценить эффективность нелинейного процесса, связанного с распадной неустойчивостью ленгмюровских колебаний с перекачкой их энергии к ионно-звуковым волнам. Нелинейный декремент затухания ленгмюровских колебаний рассмотрим в виде [7]: $\gamma_l = (1/2)k_l v_{Te} (\Omega/\omega_{pe})^{1/2} (e\varphi_k/T_e)$, в котором амплитуду колебаний потенциала ленгмюровской волны φ_k оценим по максимальной плотности энергии СВЧ поля в плазме, составляющей по результатам измерений $\sim 10^{-8} \text{ J (m}^3 \cdot \text{MHz)}$. В этих условиях декремент затухания ленгмюровских колебаний не превышает $10-10^2$, это весьма малая величина по сравнению с частотой ионно-звуковых волн, что позволяет пренебречь указанным нелинейным процессом.

Таким образом, в качестве основных механизмов возбуждения крупномасштабных мод низкочастотных колебаний, ограничивающих реализацию режимов турбулентного ускорения плазмы, следует рассматривать как токовую неустойчивость плазмы разрядной области МПД двигателя, так и неустойчивость пучка быстрых ионов, образующихся при формировании плазменного потока. Рассмотренные неустойчивости в наибольшей степени проявляются в предельных режимах двигательной установки и неизбежны при стационарном ускорении плазмы в высоковольтном МПД двигателе.

Список литературы

- [1] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [2] Глотова Н.Н., Кирдяшев К.П., Наумов Е.В., Острецов И.Н., Поротников А.А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. В. 10. С. 474–476.
- [3] Глотова Н.Н., Кирдяшев К.П., Острецов И.Н., Поротников А.А. // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 3. С. 506–513.
- [4] Брухтий В.И., Кирдяшев К.П. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 14. С. 42–47.
- [5] Арефьев В.И. // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 4. С. 674–679.
- [6] Калмыков А.А. // Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 48–77.
- [7] Кадомацев Б.Б. // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. Т. 4. М.: Атомиздат, 1964. С. 188–339.