

УДК 533.9.07, 621.387.424

С.А. ОГИЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ СТАРТА ДВИГАТЕЛЯ

Для поиска путей выполнения технических требований, предъявляемых к двигателю системы ориентации космического аппарата, были проведены теоретические исследования изменения интегральных характеристик стационарного плазменного двигателя после старта. Процессы в магнитной системе двигателя, которые в наибольшей степени ограничивают длительность перехода на стационарный режим работы, были детально изучены.

**стационарный плазменный двигатель, космический аппарат, малая мощность, переходный процесс после старта, интегральные характеристики, процессы в магнитопроводе**

### Введение

В настоящее время широко изучается возможность применения стационарного плазменного двигателя (СПД) в двигательных установках для системы ориентации космического аппарата. Одно из требований, предъявляемых к такому двигателю – малое время перехода на стационарный режим работы после его старта.

**Обзор работ и формулирование задач исследования процессов на переходном режиме работы СПД.** К настоящему времени не опубликованы работы, в которых был бы изложен детальный комплексный подход к изучению переходных процессов в СПД с момента старта. Для углублённого исследования выделены следующие задачи.

1. Определение процессов и элементов СПД, которые определяют время выхода на стационарный режим работы.

2. Исследование переходных процессов в магнитопроводе СПД и в цепи питания магнитных катушек начиная с момента старта.

3. Изучение зависимости интегральных характеристик СПД в переходный период от процессов в магнитной системе.

### 1. Решение задач. Результаты

**1.1. Исследование переходных процессов в разрядном промежутке СПД.** Среди процессов, происходящих в СПД в переходный период выделены: – процессы в магнитной системе, включая цепь питания и магнитопровод; – процессы движения частиц в разрядном промежутке. Априорная оценка длительности переходного процесса в магнитной системе даёт величину 1000...10000 мкс. Время возможного “запаздывания” в переносе зарядов через разрядный промежуток – порядка  $10^{-5}$  с. Полагая, что в переходный период уменьшение концентрации атомов в разрядной камере (РК) “мгновенно” следует за изменением в распределении электронов. Таким образом, наиболее инертные процессы переходного периода происходят в магнитной системе СПД, а разрядный ток  $I_p(t)$  отражает изменения в разрядном промежутке с “запаздыванием” порядка  $10^{-5}$  с. Далее, рассматривая процесс нарастания разрядного напряжения как дискретный, для определения процессов в разрядном промежутке, как базовая, была использована математическая модель ионизации и ускорения газа (МИУ), разработанная ранее [1] для стационарного режима.

**1.2. Исследование переходных процессов в магнитной системе СПД, определяющих величину магнитного поля в разрядной камере.** Для исследования переходных процессов в магнитной системе СПД была разработана математическая модель по изучению процессов в отдельной магнитной катушке с сердечником (ММК) на основе эквивалентной схемы электрической цепи (рис. 1) магнитной катушки (МК), включающей: а) источник питания с ЭДС –  $\varepsilon_{уст}$  (определяется напряжением холостого хода  $U_{xx}$  и сопротивлением  $r_{уст}$ ); б) нагрузку  $R_{dv}$ ; в) индуктивный элемент  $L$ , который условно замещается активным сопротивлением  $r_b$  и источником ЭДС –  $\varepsilon_{сам}$  (направленной противоположно  $\varepsilon_{уст}$ , когда рассматривается процесс после замыкания цепи ключом К). Уравнение баланса напряжений включает (рис. 1, 2):

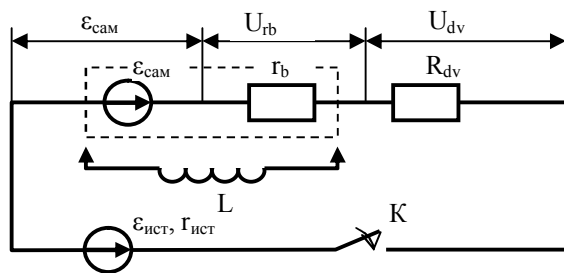


Рис. 1. Эквивалентная схема электрической цепи магнитной катушки

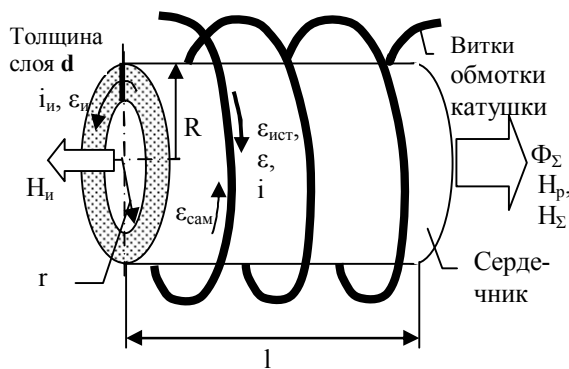


Рис. 2. Схема направлений ЭДС, токов и магнитных потоков в магнитной катушке

$$\varepsilon_{уст} = U_{rb} + \varepsilon_{сам} + U_{dv}, \quad (1)$$

где отдельные слагаемые определены следующим образом:  $\varepsilon_{уст} = U_{xx} - i \cdot r_{уст}$ ;  $U_{rb} = i \cdot r_b$ ;  $U_{dv} = i \cdot R_{dv}$ ;

$$\varepsilon_{сам} = \frac{d(i \cdot L)}{dt}. \text{ Результирующая ЭДС цепи}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{уст} - \varepsilon_{сам}. \quad (2)$$

Индуктивность катушки определялась в виде

$$L = W_{mn} \cdot 2 / i^2, \quad (3)$$

где  $W_{mn} = B_{\Sigma} \cdot H_{\Sigma} \cdot V_c / 2 = \Phi \cdot i$  – энергия магнитного поля в объёме магнитопровода  $V_c = l \cdot \pi \cdot r^2$ .  $H_{\Sigma}$  и  $B_{\Sigma}$  – результирующая напряжённость поля и магнитная индукция связаны зависимостью  $B_{\Sigma} = f(H_{\Sigma})$  для конкретного материала;  $\Phi$  – поток магнитной индукции  $B_{\Sigma}$  через катушку;  $H_{\Sigma}$  – рассматривается как результирующая напряжённость поля, создаваемая действием токов;  $i_u$  – ток в поверхностном слое толщиной  $d$  сердечника магнитопровода, протекающего под действием ЭДС  $\varepsilon_u$ ;  $i$  – тока в витках катушки, протекающего под действием результирующей ЭДС  $\varepsilon$ . При этом

$$H_{\Sigma} = H_p - H_u, \quad (4)$$

где отдельные слагаемые определены как:

$$H_u = \frac{i_u}{2 \cdot r}, \quad H_p = \frac{N \cdot i}{l} \cdot K_b, \text{ а } K_b - \text{ функция радиуса}$$

$$\text{витков, } r_b = \frac{\rho_{Cu} \cdot N \cdot \pi \cdot R}{D_{np}^2 \cdot \pi / 4}, \quad i = \frac{\varepsilon}{r_{уст} + r_b + R_{dv}},$$

$d = R - r$ ;  $N$  – число витков;  $d$  – толщина слоя, в котором сосредоточен ток  $i_u$ ;  $D_{np}$  – диаметр провода;  $R$  – диаметр витков катушки;  $\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное электрическое сопротивление материала провода;  $l$  – длина катушки;  $R_{dv}$  – сопротивление активной нагрузки;  $K_b$  – коэффициент, учитывающий соотношение длины и диаметра соленоида.

При этом полагалось, что действительное распределение плотности тока по толщине сердечника заменено распределением тока, сосредоточенного в слое толщиной  $d$ .

ЭДС  $\varepsilon_u$ , наводимая в верхнем слое (толщиной  $d$ ) сердечника катушки

$$\varepsilon_u = d\Phi_{\Sigma} / dt, \quad (5)$$

где  $\Phi_{\Sigma} = B_{\Sigma} \cdot \pi \cdot r^2 = f(H_{\Sigma}) \cdot \pi \cdot r^2$  – изменяющийся поток магнитной индукции. Ток в слое  $d$ , возникающий под действием  $\varepsilon_u$ ,

$$i_u = \frac{\varepsilon_u}{R_{слоя}},$$

где  $R_{\text{слоя}} = \frac{\rho_{Fe} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{l \cdot d}$  – сопротивление току  $i_u$ ;

$\rho_{Fe}$  – удельное электрическое сопротивление материала сердечника (ферромагнетика).

Мощность, затрачиваемая на нагрев слоя сердечника, в котором протекает ток  $i_u$

$$\varepsilon_u \cdot i_u = \varepsilon_{ucm} \cdot i - i^2 \cdot (R_{dv} + r_b + r_{ucm}) - \frac{d(W_{mn} / \mu)}{dt} \quad (6)$$

Вышеприведенные уравнения (1 – 6) решаются совместно. При этом следует выбирать те значения тока  $i$  (решения уравнений), которые отвечают наибольшему увеличению энтропии системы.

Используя ММК было детально изучено генерирование и изменение контурного тока, протекающего в поверхностном слое элемента магнитопровода под действием изменяющегося магнитного поля; выделение джоулева тепла при протекании этого тока; явление магнитного насыщения магнитопровода; генерирование и изменение ЭДС в витках магнитной катушки под действием изменяющегося магнитного поля. Для проверки ММК были рассчитаны и сопоставлены с экспериментальными результатами временные зависимости нарастания тока в отдельной катушке. Аналогичная зависимость была рассчитана по известной формуле полагая постоянной индуктивность катушки  $i_{\text{форм}} = U/r \cdot (1 - \exp(-r/L \cdot t))$ , где  $r$  – омическое сопротивление элемента цепи питания;  $U$  – напряжение источника питания;  $t$  – время;  $L \approx \text{const}$  – индуктивность магнитной катушки. Результат анализа экспериментальных и расчётных результатов (рис. 3) показывает их качественное соответствие и подтверждает адекватность описания изучаемых процессов с помощью ММК. Далее, базируясь на ММК, была разработана математическая модель переходного процесса в магнитной системе СПД (ММС) при следующих допущениях. Вследствие того, что поверхностный слой, в котором наводится индуктивный ток, для полюсных наконечников и для задней стенки магнитопровода имеет в несколько раз большую протяжённость, чем для сердечников катушек и для центрального маг-

нитопровода СПД, то потерями энергии на нагрев металла индукционным током пренебрегали.

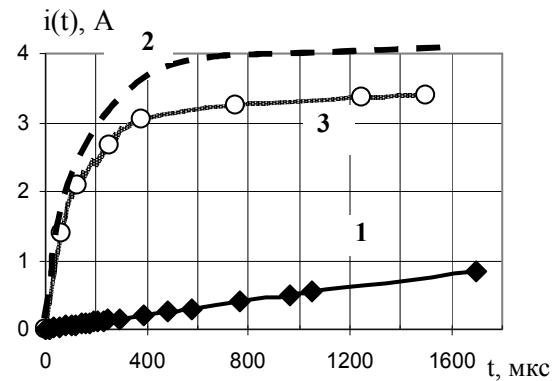


Рис. 3. Изменение во времени тока в магнитной катушке:  
 1 –  $i_{\text{форм}}(t)$  расчёт по известной формуле при  $L = \text{const}$ ; 2 –  $i_{\text{мод}}(t)$  расчёт по ММК;  
 3 –  $i_{\text{экспер}}(t)$  определено экспериментально

При этом потери в слое с сопротивлением  $R_{\text{слояЦ}}$  центрального сердечника, через который проходит поток индукции  $\Phi_{\text{ц}}$  определялись в виде  $W_{\text{потерьЦ}} = (d\Phi_{\text{ц}} / dt)^2 / R_{\text{слояЦ}}$  и аналогично – для периферийных сердечников. Используя ММС, рассчитано изменение индукции магнитного поля на срезе РК СПД (рис. 4).

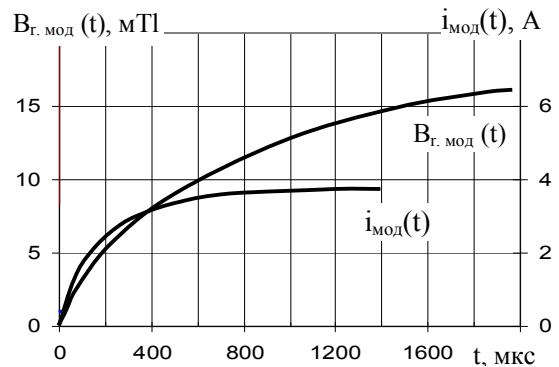


Рис. 4.  $B_{r.\text{мод}}(t)$  – изменение во времени индукции магнитного поля на срезе РК и тока в катушке  $i_{\text{мод}}(t)$ , рассчитанные по ММС

**1.3. Расчёт изменения интегральных характеристик СПД в переходный период после старта двигателя.** Для расчёта временных зависимостей тяги  $F_T(t)$ , удельного импульса  $I_{sp}(t)$ , тягового КПД  $\eta_T(t)$  и разрядного тока  $I_p(t)$  была использована следующая методика. Используя модель магнитной системы –ММС (п. 1.2), задавая вольт-амперную

характеристику источника питания магнитной катушки и характерные геометрические размеры магнитной системы двигателя рассчитывались зависимости  $B_{r,mod}(t)$  и  $i_{mod}(t)$  (рис. 2). При расчёте задавалось такое напряжение источника питания, которое обеспечивает ток, необходимый для создания магнитной индукции на срезе РК величиной 16...17 мТл. Используя модель ионизации и ускорения – МИУ (п. 1.1) и определённые зависимости  $B_{r,mod}(t)$ , задавая массовые расходы через анодный блок и катод, а также величину разрядного напряжения и характерные размеры двигателя определены зависимости  $F_T(t)$ ,  $I_{sp}(t)$ ,  $\eta_T(t)$ ,  $I_p(t)$  (рис. 5, 6).

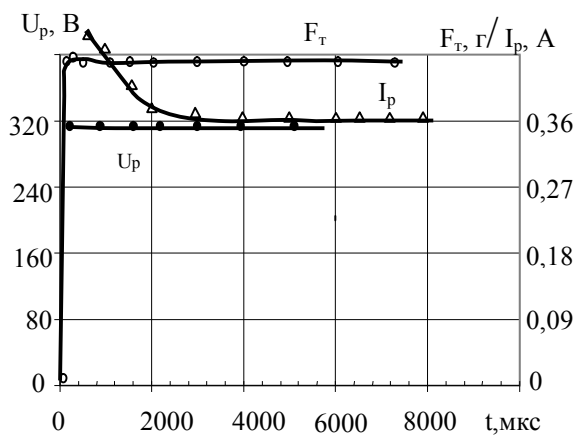


Рис. 5. Изменение во времени тяги  $F_m(t)$  и разрядного тока  $I_p(t)$  СПД малой мощности после старта, рассчитанное по математической модели

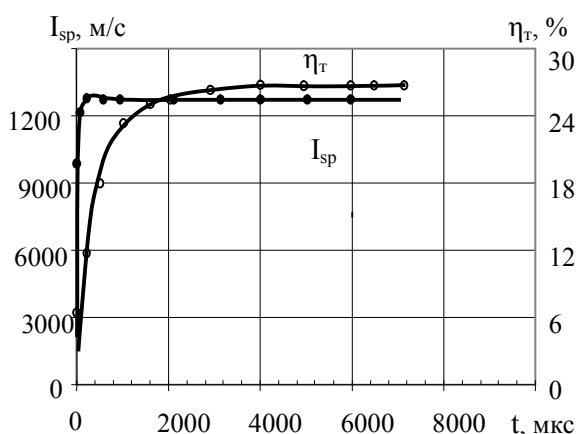


Рис. 6. Изменение во времени удельного импульса  $I_{sp}(t)$  и тягового КПД  $\eta_m(t)$  СПД малой мощности после старта, рассчитанное по математической модели

Расчёт проведен при условии одновременного включения источников питания основного разряда

(стабилизированное напряжение  $U_p = 315$  В) и магнитной системы двигателя.

## Заключение

1) СПД после инициирования разряда выходит на режим с относительно стабилизированной тягой за время не более 1.5 миллисекунды и стабилизированным КПД за время в пределах 2.5 миллисекунд. В дальнейшем возможно изменение интегральных характеристик СПД вследствие нагрева элементов конструкции в течение примерно 1 часа.

2) На основе анализа результатов расчётов, полученных с использованием разработанных математических моделей (процессов в магнитной системе, процессов в разрядном промежутке двигателя) предложены следующие направления исследовательских и конструкторских работ, для повышения динамических характеристик СПД. Создание условий для быстрого увеличения магнитного поля (что определяет эффективность процессов ионизации и ускорения рабочего тела) используя известные методы: применяя магнитные материалы с возможно большим удельным электрическим сопротивлением; уменьшая толщину элементов конструкции магнитопровода.

Далее, для уточнения расчётов, планируется расчёт распределения потенциала в СПД.

## Литература

- Oghienko S., Oranskiy A., Belokon V., Bober A. Study of some key problems of hall accelerator operation in the extended range of discharge voltage // Problems of Atomic Science and Technology. – 2007. – № 1. Series “Plasma physics” (13). – Kharkov – P. 170-173.

Поступила в редакцию 31.05.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского “ХАИ”, Харьков.