

УДК 533.9.07

А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО, П.С. ПРИХОДЬКО, Е.П. СОЛОНИНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЫЯВЛЕНИЕ ДВУХПИКОВОСТИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В ДВИГАТЕЛЕ МСПД-12**

В работе показана перспективность использования электрореактивных двигателей малых типоразмеров типа СПД для коррекции орбиты микроспутников. Для исследования взят образец микро СПД12. Разработан экспериментальный стенд и указаны основные характеристики систем, входящих в его состав. Получены вольт-амперные характеристики при разных расходах рабочего вещества через анод и определен оптимальный режим работы двигателя при условии максимального к.п.д. При помощи многосеточного зонда получены зондовые вольт-амперные характеристики. После обработки зондовых ВАХ получены функции распределения ионов по энергиям, среди них выделены 4 характерных участка.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, функция распределения, ионный поток, СПД, к.п.д., многосеточный зонд, магнитные силовые линии, разрядная камера.

Введение

Развитие космических технологий в настоящее время позволяет решать многие задачи: научно-технические, оборонные, задачи связи и др. Развитие элементной базы электроники на данном этапе позволяет создавать полнофункциональные космические аппараты, вес которых в сравнении с аппаратами той же функциональности, но будучи сделанными пятнадцать лет назад, разниться на порядок. В связи с этим все большую популярность приобретает класс аппаратов типа «микроспутник». Аппарат весом от 20 до 150 килограмм может позволить себе даже небольшая страна. Малый отрезок времени, который нужен для создания аппарата, дает гарантии, что аппарат технически не устареет.

На низких орбитах (250...300 км) на спутник действуют силы трения, достаточные для того, что бы снизить скорость аппарата и опустить его в плотные слои атмосферы достаточно быстро. Вследствие этого аппарат может выйти из строя раньше запланированного срока. Такой случай произошел с аппаратом проекта «Компас-2», запущенным 26 мая 2006 года в 22 часа 50 минут. Вместо запланированных 4,5 месяцев, он пробыл на орбите чуть более полутора и в июле 2006 года был выведен из строя. Этого можно было бы избежать, если бы аппарат был оборудован двигательной установкой коррекции орбиты. В настоящее время уровень развития науки и техники позволяет решить задачу коррекции орбиты для аппаратов класса «микроспутник».

1. Экспериментальное оборудование и методика проведения эксперимента

Расчет основных характеристик и основных геометрических размеров СПД произведен в соответствии с методикой, изложенной в учебном пособии [1]. В качестве основной цели расчета рассматривается задача по определению совокупности значений геометрических размеров и параметров магнитной системы, которые в совокупности призваны обеспечить требуемые характеристики.

На основе проведенного расчета в корпусе СПД-20 был создан лабораторный образец МСПД-12.1, который изображен на рис. 1.1. Расчет магнитной системы (МС), показал, что необходима оптимизация МС. Результатом оптимизации конструкции явилась модификация МСПД-12.2. трехмерная модель которого разработана в САМ-среде Solid Works (рис. 1.2).

Т.к. при создании лабораторного образца не было возможности использовать уже имеющиеся детали, то из соображений экономии средств и времени модель выполнена без силового корпуса.

Перед готовой моделью МСПД-12.2 были поставлены следующие задачи для исследования:

1. Определение вольтамперных характеристик.
2. Определение вольтрасходных характеристик.
3. Определение оптимального режима работы двигателя. Критерием оптимальности принять функцию распределения ионов по энергиям.

4. Определение угла раскрытия плазменного факела.

5. Ресурсные испытания с целью выявления слабых мест конструкции и изменения характеристик, связанных с износом ее элементов.

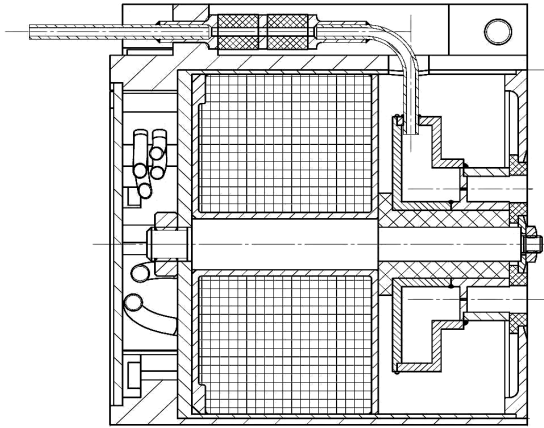


Рис. 1.1. МСПД-12.1



Рис. 1.2. МСПД-12.2 общий вид

На рис. 1.3 представлена схема экспериментальной установки.

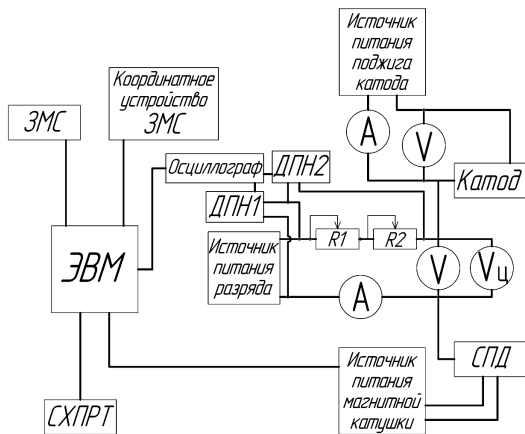


Рис. 1.3. Схема экспериментальной установки

На схеме приняты следующие обозначения:
 ЗМС – зонд многосеточный;
 ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
 СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела;

ДПН – дифференциальный пробник напряжения;

А – амперметр;

V – вольтметр;

V_ц – вольтметр цифровой;

СПД – стационарный плазменный двигатель.

Задавшись значением расхода, который будет использован для проведения эксперимента, был определен оптимальный режим работы двигателя. Критерием качества приняты величины колебаний разрядного тока и напряжения, а так же форма зондовой вольтамперной характеристики.

Для измерения зондовых ВАХ многосеточный зонд (ЗМС) был установлен в точку максимального ионного тока. Для этого, ЗМС, установленный соосно с двигателем, перемещался перпендикулярно оси двигателя.

Точка максимального ионного тока принята как нулевое положение зонда.

Далее уточнялись координаты многосеточного зонда в одиннадцати экспериментальных точках (рис. 1.4).

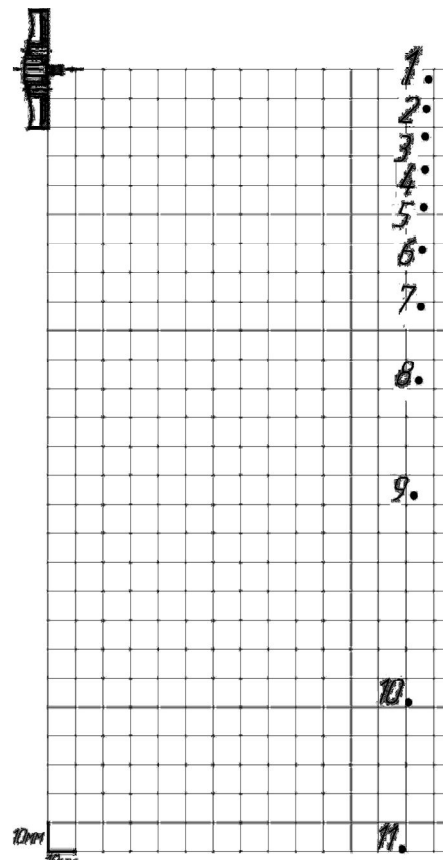


Рис. 1.4. Расположение одиннадцати экспериментальных точек

Позиционирование зонда осуществлялось по трем осям: две линейные координаты и одна угловая. В полученных одиннадцати точках проведено качественное измерение зондовых ВАХ.

Многосеточный зонд (или электростатический анализатор плазмы) в данном эксперименте применяется для исследования параметров ионного пучка. ЗМС позволяет измерять ионный ток и отображать зависимость ионного тока от разрядного напряжения в режиме реального времени.

Для решения поставленной задачи был применен четырехэлектродный зонд с подачей анализирующего потенциала на коллектор. Для направленного тока тормозная характеристика представляет собой энергетический спектр ионов. Чтобы измерения кривых задержки были корректными, плотность тока на коллектор не должна превышать максимальный ионный ток. Для данного случая ошибки, связанные с фототоками незначительны.

При разработке конструкции многосеточного зонда были учтены некоторые основные моменты, такие как приведены далее.

- Размер ячейки входной сетки должен быть меньше двух дебаевских радиусов экранирования. Это необходимо для того, чтобы внутренние потенциалы зонда не проникали во внешнюю область, заполненную плазмой. Если плотность в исследуемой области $n_e \approx 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 1 \dots 1,5 \text{ эВ}$, то $r_D \approx 0,03 \dots 0,15 \text{ мм}$.

- Конструкция зонда предусматривает возможность его разборки, замены отдельных элементов и при необходимости изменения внутренней конфигурации.

- Размер ячейки входной сетки $h = 0,1 \text{ мм}$, диаметр проволоки $\delta = 0,05 \text{ мм}$. Длина зонда в собранном виде – 8,5 мм. Максимальный наружный диаметр – 9 мм. Собирающая часть выполнена в виде цилиндра диаметром 20 мм, длиной 80 мм и толщиной 0,15 мм.

Электрическая схема подключения зонда приведена на рис. 1.5.

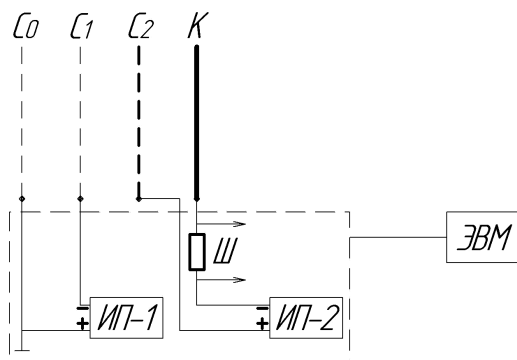


Рис. 1.5. Электрическая схема многосеточного зонда

Потенциал, осуществляющий разрыв плазмы, подается на сетку C_1 от источника ИП-1 с возможностью регулировки. Анализирующий потенциал подается на коллектор от источника ИП-2 с диапазоном регулировки 0...350 В. Корпус зонда электрически изолирован от стапеля и заземлен в одной общей точке, чтобы исключить образование петель по заземлению, и как следствие появление паразитных сигналов. Все токоподводы и вакуумные вводы тщательно изолированы.

Напряжение отсечки в $U_{отс} = 60 \text{ В}$ обеспечивает отсутствие тока коллектора при больших анализирующих потенциалах, что указывает на полный разрыв плазмы.

Для изготовления наружной сетки был применен молибден. В качестве изоляторов применена керамика с рабочей температурой выше 500 °С. В качестве проводников применены провода типа ПОЖ. Комплекс аппаратуры и программного обеспечения для многосеточного зонда позволяет в режиме реального времени проводить измерения зондовых ВАХ источника плазмы, вычислять локальные параметры плазмы, отображать и сохранять полученные результаты в памяти ЭВМ.

Технические характеристики комплекса:

Количество измерительных каналов – 2 шт..

Разрядность ADC 1 и 2 – 16.

Время проведения 1 измерения ADC – 1 мкс.

Диапазон напряжений зонда – –20 В... +400 В.

Количество шунтов – 4 шт.

Количество управляемых координат – 3 шт.

Интерфейс обмена с ЭВМ – RS²³².

Комплекс состоит из трех основных частей:

- блок измерений;
- преобразователь интерфейса;
- механизм 3-х координатного перемещения.

Сигнал от зонда, пройдя через фильтры, попадает на блок измерений с системой шунтов и АЦП, после чего данные поступают на ЭВМ, где обрабатываются и сохраняются в автоматическом режиме.

Для измерения углового распределения ионного тока плазменного факела при помощи ЗМС применяется специальная трехкоординатная система перемещений, позволяющая позиционировать датчик с шагом 1 мм и 1° в области 285x245мм и 180° соответственно. Погрешность перемещений при этом составляет 0,5 мм для линейных перемещений и 0,5° для угловых.

Так как для получения ФРИЭ необходимо продифференцировать кривую, возникает необходимость в ее предварительном сглаживании для избавления от шумов. Для оценки оптимального количества дублирований была исследована зависимость средней погрешности от количества дублирований.

В результате чего было выявлено, что при количестве дублирований более 15 коэффициент корреляции превосходит 0,91 (рис. 1.6). В связи с этим было выбрано количество дублирований равное 12.

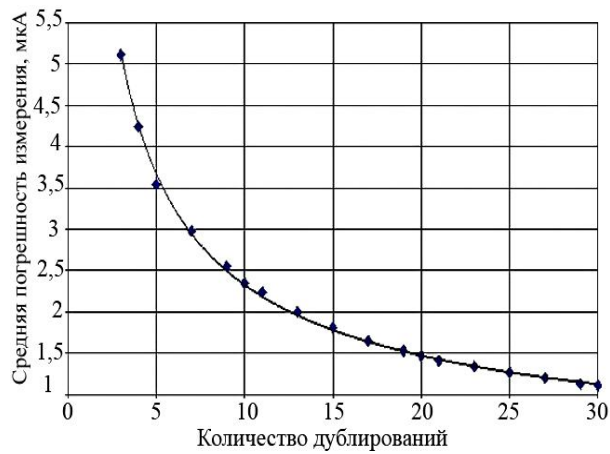


Рис. 1.6. Зависимость средней погрешности от количества дублирований

После, полученные результаты подлежат обработке на ЭВМ. По результатам обработки данных можно построить графики для каждой точки (рис. 1.7).

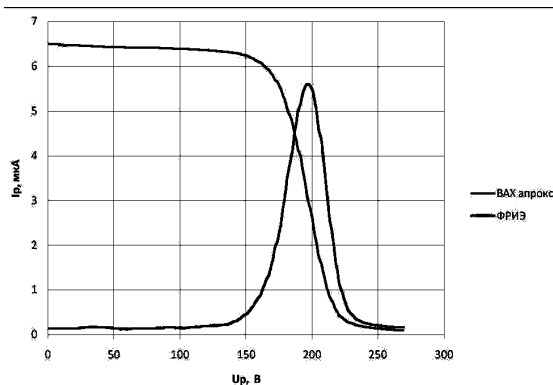


Рис. 1.7. Зондовые ВАХ и ФРИЭ

2. Анализ полученных данных

Измерение зондовых вольт-амперных характеристик проводилось в 11 экспериментальных точках с максимальным углом к оси двигателя 66° . Схема движения зонда, относительно двигателя приведена на рис. 2.1.

В результате измерений в экспериментальных точках были получены следующие вольт-амперные характеристики (рис. 2.2).

Из вольтамперных характеристик видно, что основной ионный поток сосредоточен в первых трех точках измерения, значит, достигается хорошая фокусировка струи плазмы и плотность тяги. В двух последних точках измерения (60° и 66°) значения

ионного тока практически одинаковы и очень малы, основного вклада в тягу не вносят. Это позволяет прогнозировать, что при дальнейшем удалении от источника плазмы, ионный поток будет изменяться незначительно.

После обработки зондовых ВАХ были получены функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) в указанных точках. Приведены на рис. 2.3.

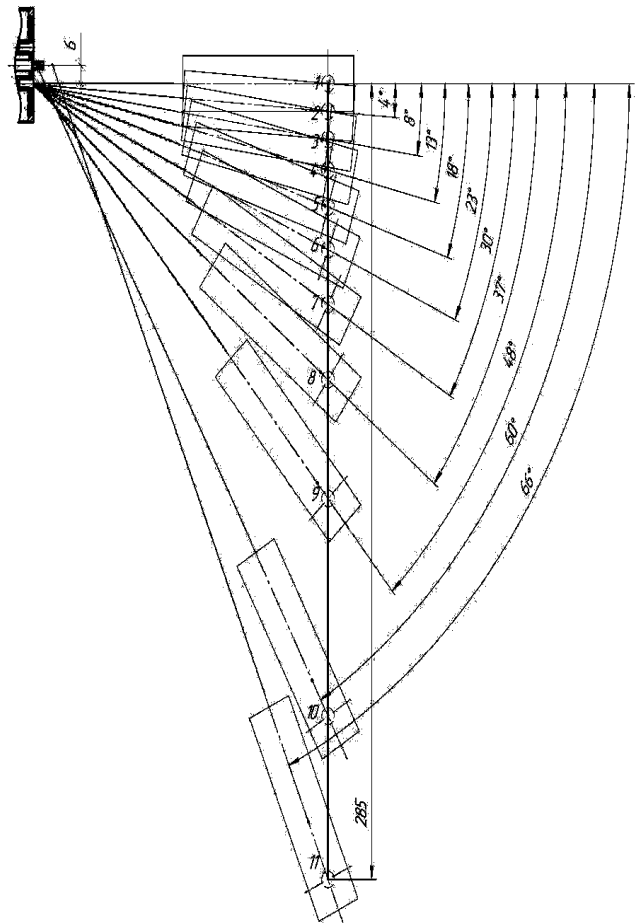


Рис. 2.1. Расположение измерительной части зонда в экспериментальных точках

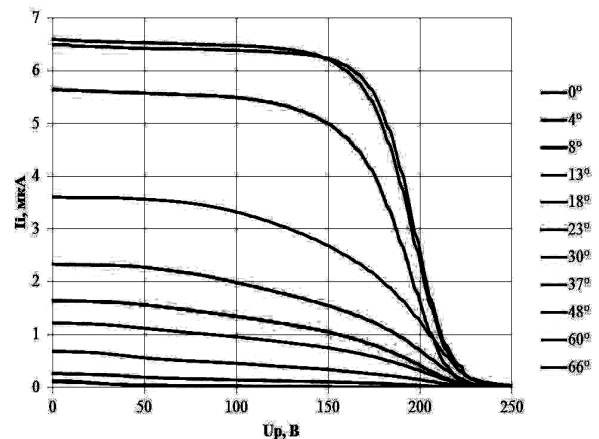


Рис. 2.2. Вольтамперные характеристики двигателя в экспериментальных точках

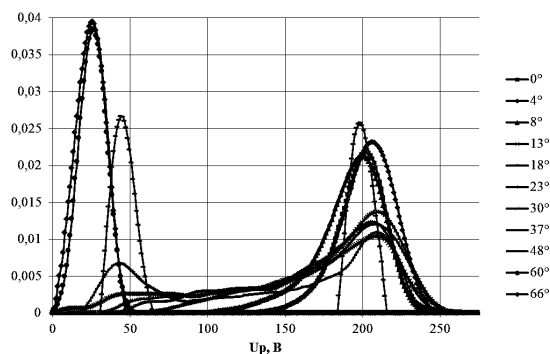


Рис. 2.3. ФРИЭ в экспериментальных точках

В результате анализа полученных ФРИЭ были выделены четыре характерных участка:

1 моновысокоэнергетичная, содержащая только высокоэнергетичные ионы. Углы $0...8^\circ$;

2 переходная – с преобладанием высокоэнергетичных частиц, но с малой долей низкоэнергетичных ионов. Причем при увеличении угла доля низкоэнергетичных ионов возрастала, а высокоэнергетичных – снижалась. Углы $13...30^\circ$;

3 биэнергетичная, содержащая как высокоэнергетичные, так и низкоэнергетичные ионы. Причем количество высокоэнергетичных частиц и низкоэнергетичных частиц оказалось практически одинаково. Углы $37...48^\circ$;

4 мононизкоэнергетичная, содержащая только низкоэнергетичные ионы. Углы $60...66^\circ$.

В первых трех экспериментальных точках ($0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$) (рис. 2.4) в подавляющем большинстве преобладают высокоэнергетичные ионы.

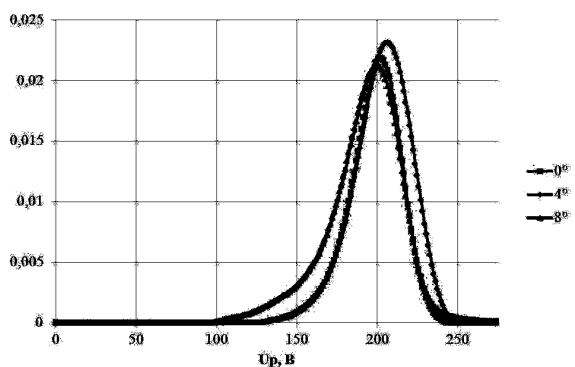


Рис. 2.4. ФРИЭ при наличии только высокоэнергетичных ионов

Эти ФРИЭ указывают, что МСПД работает с большой эффективностью. Хорошая фокусировка ионной струи указывает на то, что процесс ионизации происходит глубоко в канале МСПД.

При углах $13^\circ, 18^\circ, 23^\circ, 30^\circ$ (рис. 2.5) наблюдается переходная зона. И чем больше угол, а значит больше и линейное расстояние от двигателя, тем более выраженной становится переходная зона.

Это означает, что в незначительном количестве появляются низкоэнергетичные ионы, которые ускорены меньшим потенциалом, чем приложен между катодом и анодом. Связано это может быть с падением анодного потенциала к срезу МСПД.

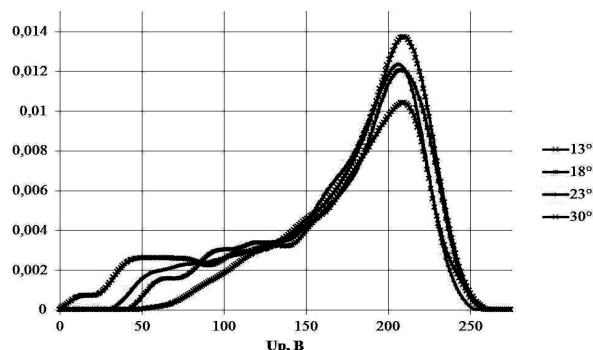


Рис. 2.5. ФРИЭ с переходной зоной

При большем удалении и измерении в углах 37° и 48° (рис. 2.6) точка максимального ионного тока смещается в центр двигателя, не смотря на то, что из этой точки еще есть прямая видимость РК. Поэтому наблюдаемый эффект в большей степени связан с ионным пучком вне ускорительного канала. Наблюдаются явно выраженные пики распределения ионов как в высокоэнергетичной, так и в низкоэнергетичной зоне. Зондовая ВАХ при этом имеет двойной ярко выраженный излом.

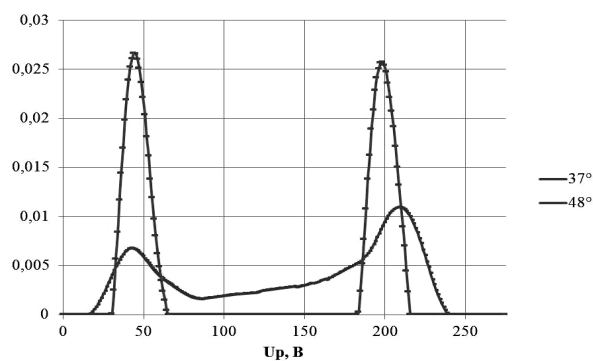


Рис. 2.6. ФРИЭ при наличии как высокоэнергетичных, так и низкоэнергетичных ионов

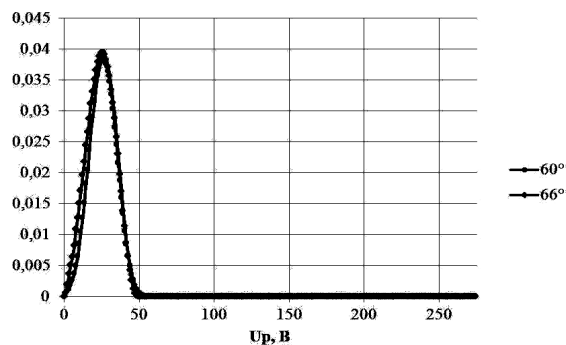


Рис. 2.7. ФРИЭ при наличии только низкоэнергетичных ионов

Для наиболее удаленных точек 60° и 66° (рис. 2.7) характерно наличие только низкоэнергетичных ионов. Связано это с тем, что процессы ионизации и ускорения продолжаются и вне ускорительного канала, хоть и не так интенсивно. И поскольку столкновения происходят в объеме не ограниченном чем либо, то имеет место разлет ионов во всех направлениях.

3. Определение погрешности эксперимента

Во время проведения измерений наблюдались значительные колебания разрядного напряжения, которые имеет прямое влияние на величину зондовых ВАХ. Для правильного анализа полученных данных необходимо знать закон распределения измеряемой величины. Измеряемой величиной в настоящем эксперименте является ионный ток, а он напрямую зависит от разрядного напряжения. Поэтому зная закон распределения разрядного напряжения можно применить его к ионному току.

В течении десяти минут была сделана выборка разрядного напряжения из ста значений, которые были отсортированы по возрастанию.

Исходя из обработанных данных, можно построить гистограмму, которая является аналогом закона распределения (рис. 3.1).

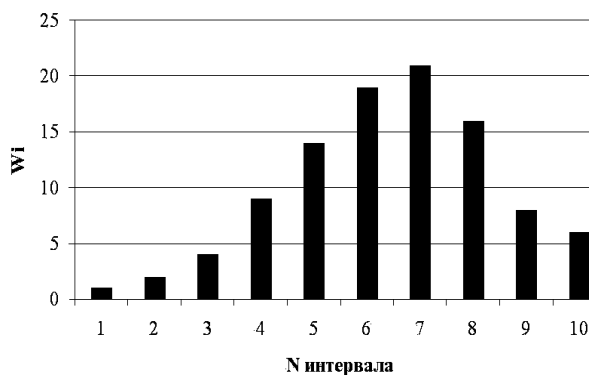


Рис. 3.1. Гистограмма, аналог закона распределения

Форма гистограммы больше всего напоминает нормальный закон распределения, поэтому нулевой гипотезой принимаем нормальный закон распределения.

Для проверки гипотезы о виде распределения генеральной совокупности примем критерий согласия Пирсона [5]:

$$\phi = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - n_i \cdot p_i)^2}{n_i \cdot p_i}, \quad (3.1)$$

где r – количество интервалов, на которые разбиты выборочные значения; n – объем выборки; n_i – количество элементов выборки, которые попали в i -й интервал; p_i – вероятность того, что случайная величина попадет в i -й интервал, рассчитанная по закону, который проверяется.

Величина ϕ распределена по закону χ^2 со $(r-1-k)$ степенями свободы, где k – количество параметров распределения, оценки которых найдены по выборке;

Критическая область имеет вид [5]:

$$(\chi_{кр.\alpha}; +\infty), \quad (3.2)$$

где α – заданный уровень значимости.

Найдем среднее значение по выборке $x_{ср} = 223,2724$

Рассчитаем математическое ожидание [5]:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^r \frac{x_{iср} \cdot n_i}{n} = 232,27. \quad (3.3)$$

Найдем дисперсию [5]:

$$D = \sum_{i=1}^r \frac{(x_{iср} - \bar{M})^2 \cdot n_i}{n} = 8,028. \quad (3.4)$$

Найдем среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{8,028} = 2,83. \quad (3.5)$$

Нормируем границы интервалов (табл. 3.1)

$$(x_{i-1}; x_i) \rightarrow \left(\frac{x_{i-1} - \bar{M}}{\sigma}; \frac{x_i - \bar{M}}{\sigma} \right). \quad (3.6)$$

Находим вероятность попадания в интервалы (табл. 3.1):

$$p_i = \Phi \left(\frac{x_i - \bar{M}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{x_{i-1} - \bar{M}}{\sigma} \right). \quad (3.7)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа.

Принимаем уровень значимости $\alpha = 0,01$, и по таблице распределения χ^2 находим

$$\chi_{кр} = \chi_p^2(k) = 18,5,$$

учитывая, что $k = r - m - 1 = 7$.

Поскольку $\phi_{выб} = 1,072883 \leq 18,5$ тогда значения критерия не попали в критическую зону $(\chi_{кр}; +\infty)$, тогда гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности – принимается.

Определяем погрешность измерения [5]:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{M} \cdot 100 = \frac{2,83 \cdot 100}{232,27} = 1,218 \%. \quad (3.8)$$

Погрешность измерения эксперимента составляет 1,218 %.

Таблица 3.1

Результаты расчета
по критерию Пирсона

Нормированные границы интервалов		p_i	$n_i \cdot p_i$	ϕ_i
$-\infty; -2,55$		0,0052	0,52	0,44308
$-2,55; -2,03$		0,0152	1,52	0,15158
$-2,03; -1,52$		0,0436	4,36	0,02972
$-1,52; -1$		0,0944	9,44	0,02051
$-1; -0,49$	4	0,1534	15,34	0,11705
$-0,49; 0,03$	9	0,1964	19,64	0,02086
$0,03; 0,55$	1	0,1968	19,68	0,08854
$0,55; 1,06$	16	0,1466	14,66	0,12248
$1,06; 1,58$		0,0875	7,58	0,06429
$1,58; +\infty$		0,0571	5,71	0,01473
$\phi_{\text{выб.}} = 1,07283$				

Выводы

В результате анализа экспериментальных данных были выявлены характерные зоны: высокоэнергетичная, переходная, двухпиковая и низкоэнергетичная. Объяснить наблюдаемое явление можно с точки зрения переходных процессов и процессов ионизации и ускорения, продолжающихся вне разрядной камеры двигателя. В плазме вне двигателя значение ускоряющего потенциала в несколько раз меньше, отсюда и низкая энергия ионов, процесс происходит в объеме вне камеры, поэтому низкоэнергетичные ионы могут иметь угол разлета порядка 90° .

Наиболее интересной зоной является четвертая, которая содержит только низкоэнергетичные частицы. Причем измерительная часть зонда при измере-

нии на углах $60 \dots 66^\circ$ направлена не на двигатель, а на плазменную струю за ним. На основе этого можно построить предположение о том, что имеется вторая зона ионизации, генерирующая низкоэнергетичные частицы. Поскольку энергия частиц не большая (порядка $25 \dots 50$ эВ), то паразитная зона ионизации находится в месте не большого потенциала, т.е. вне разрядной камеры двигателя. Ионы, образовавшиеся в этой зоне, не ограничены в объеме и могут иметь угол разлета до 90° к оси двигателя, но это пока не доказано.

Возможно, причиной характерной эрозии выходной части двигателя являются в основном эти ионы с углом разлета до 90° . Это явление негативно сказывается на качестве работы двигателя и снижает его ресурс, фокусировку и угол раскрытия плазменного факела двигателя, вызывает эрозия выходных кромок разрядной камеры.

Для того чтобы уменьшить долю низкоэнергетичных частиц необходимо оптимизировать магнитную систему двигателя.

Литература

1. Огиенко С.А. Методика расчета основных энергетических характеристик и геометрических размеров СПД / С.А. Огиенко. – Х.: ХАИ, 2006. – 30 с.
2. Стационарные плазменные двигатели / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. – Х.: ХАИ, 1989. – 315 с.
3. Конструкция стационарного плазменного двигателя / Н.В. Белан, В.Ф. Гайдуков, Т.А. Максименко, С.А. Огиенко, А.И. Оранский. – Х.: ХАИ, 2005. – 19 с.
4. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Миронова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
5. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД / А.И. Морозов. – М., 1978. – 320 с.
6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; пер. Е.Г. Коваленко; под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 376 с.

Поступила в редакцию 27.052010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Г.И. Костюк, Харьковский аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**ВИЯВЛЕННЯ ПОДВІЙНОГО ПІКУ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛЕННЯ ІОНІВ
ПО ЕНЕРГІЯМ РУШІЯ МСПД-12***А.В. Лоян, Т.О. Максименко, П.С. Приходько, Є.П. Солонинко*

В роботі показано перспективність використання електроракетних рушіїв малих розмірів типу СПД для корекції орбіти мікросупутників. Для дослідження взята лабораторна модель мікро СПД-12. Розроблений експериментальний стенд та вказані основні характеристики систем, що входять в його склад. Отримані вольт-амперні характеристики при різних витратах робочої речовини через анод і визначений оптимальний режим роботи рушія при умовах максимального к.п.д. За допомогою багатосіткового зонда отримані зондові вольт-амперні характеристики. Після обробки зондових ВАХ, отримані функції розподілення іонів по енергіям, серед яких виділено 4 характерні ділянки.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, функція розподілення іонів, іонний струм, СПД, к.к.д., багатосітковий зонд, магнітні силові лінії, розрядна камера.

**DETECTION OF IONS ENERGY DOUBLE PEAK DISTRIBUTION FUNCTION
IN MSPT-12 THRUSTER***A.V. Loyan, T.A. Maksymenko, P.S. Prihodko, Ye.P. Solonyanko*

The work presents the relevance of using small type electric propulsion as SPT for microsattelites for orbit correction. The laboratory model SPT-12 was taken for research. The test bed was developed; the main characteristics of test bed systems are adduced. Volt-ampere characteristics in dependence of different flow rate through anode were measured and the regime of optimal thruster operation in maximal efficiency was defined. Volt-ampere characteristics were measured using Retarded Potential Analyzer. After the analysis of probe volt-ampere characteristics the ion energy function distribution were defined, among the there were detected 4 characteristic curve pieces.

Key words: volt-ampere characteristics, function distribution of ions, ions current, SPT, efficiency, retarded potential analyzer, magnetic flux, discharge chamber.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Максименко Тарас Александрович – научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: taras@d4.khai.edu.

Приходько Павел Сергеевич – инженер кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Солонинко Евгений Павлович – инженер двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: SolonyankoYevgen@gmail.com.