

УДК 629.78.05; 629.78.085

П.М. ТРУБНИКОВ, Г.А. ДЬЯКОНОВ, В.Н. ЯКОВЛЕВ

Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Описывается подход к исследованию рабочих процессов импульсных плазменных ускорителей. Рассмотрена методика измерения основных характеристик исследуемых ускорителей, возникающие вопросы и их решение. Приводится пример системы автоматизированного сбора и обработки экспериментальных данных.

плазма, ускоритель, методика, измерение, тяга, разрядный ток, зонд, автоматизация, расчет

Введение

Первые работы по созданию и исследованию импульсных плазменных ускорителей (ИПУ) начались достаточно давно, еще в 50-х годах XX века. Первоначально их основным практическим применением предполагалось заполнение термоядерных систем горячей плазмой [1]. Позже были рассмотрены другие возможности практического приложения ИПУ, однако из-за их низкой эффективности интерес к ним значительно снизился и в течение многих лет ИПУ применялись лишь для решения достаточно специфических задач. Однако в последние годы наблюдается увеличение интереса к ИПУ. Это связано с достижениями в увеличении его рабочих характеристик, а также тем, что стало выгодно практическое применение ИПУ в роли двигателя.

1. Постановка задачи

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция повышения интереса к малым спутникам (10 – 500 кг). Для создания функционального и недорогого спутника необходима эффективная, надежная и дешевая двигательная установка. Как один из вариантов, предполагается создание такой двигательной установки на основе импульсного плазменного двигателя (ИПД). Развитие такого практического приложения ИПУ вносит свою специфику в процесс исследования их рабочих процессов.

В настоящее время в НИИПМЭ МАИ исследуются импульсные плазменные двигатели (ИПД) рельсового типа с боковой подачей твердого рабочего тела. Схема таких двигателей приведена на рис. 1.

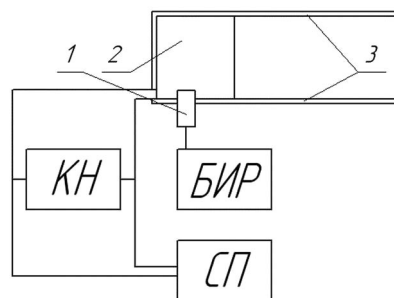


Рис. 1. Схема ИПУ:

- 1 – свеча-игнейтер;
- 2 – рабочее тело (шашка);
- 3 – электроды

Шашки подаются в рабочее пространство между электродами через боковые поверхности навстречу друг другу. Блоком инициации разряда (БИР) при помощи свечи-игнейтера между катодом и анодом инициируется разряд. Источником энергии разряда являются конденсаторные накопители (КН), зарядка которых происходит от системы питания (СП). При протекании разрядного тока между электродами за счет абляции шашек формируется плазменный сгусток. Ускорение плазменного сгустка происходит под действием электромагнитных и газодинамических сил. Электромагнитные силы соз-

даются при взаимодействии разрядного тока с поперечным собственным магнитным полем.

2. Основные параметры

При исследовании импульсных плазменных двигателей контролируются их интегральные характеристики, расход рабочего тела за один разрядный импульс и средняя тяга двигателя при определенном значении зарядного напряжения и разрядном токе. Рассчитываются тяговая эффективность ИПУ η_t , среднemasовая скорость плазменного сгустка (удельная тяга) $\langle V \rangle$ и цена тяги C_t .

Важным параметром, позволяющим судить о рабочих процессах, является также динамика и распределение разрядного тока в ускорительном канале импульсного плазменного двигателя. Знание реальной картины распределения тока во времени и в пространстве разрядного канала служит залогом того, что это распределение может быть максимально оптимизировано с целью максимального повышения эффективности тех или иных процессов.

3. Методика исследования

В процессе эксперимента зарядное напряжение конденсаторного накопителя контролируется киловольтметром. Регистрация разрядного тока производится с помощью пояса Роговского и цифрового запоминающего осциллографа. Интегрирование сигнала пояса Роговского осуществляется с помощью RC-интегратора. Чувствительность пояса с RC-интегратором составляет 17,0 кА/В. В качестве синхронизирующей аппаратуры используется генератор импульсов. Типичный вид получаемых осциллограмм показан на рис. 2.

Для измерения средней тяги ИПД используется разработанное в НИИПМЭ МАИ маятниковое тягоизмерительное устройство прямого действия с индуктивным датчиком смещения платформы.

Схема тягоизмерительного устройства приведена на рис. 3.

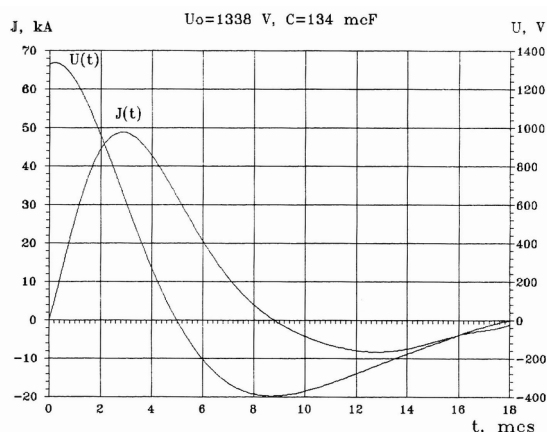


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока и напряжения

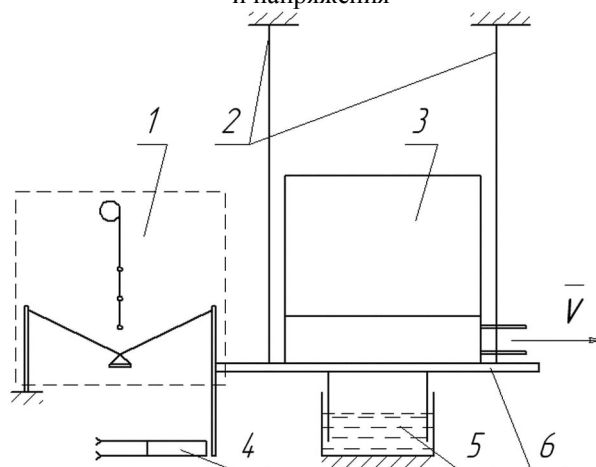


Рис. 3. Схема тягоизмерительного устройства:

- 1 – калибровочный узел;
- 2 – струны-подвесы;
- 3 – ИПУ;
- 4 – индуктивный датчик;
- 5 – демпфер;
- 6 – платформа

Измерение средней тяги ИПД производится следующим образом. Исследуемая модель ИПД закреплена на платформе, которая на трех струнах подвешена на раме, установленной в вакуумной камере. При измерении силы тяги ИПД работает с частотой $f = 2$ Гц. Вследствие создаваемой тяги платформа смещается в сторону, противоположную направлению движения плазменного сгустка. Из-за малости смещения и относительно большой длины подвесов, смещение можно считать горизонтальным. Величина смещения фиксируется по изменению зазора между индуктивным датчиком и пластиной из магнетомягкого материала, закрепленной на платфор-

ме. Абсолютная величина силы тяги F определяется по калибровочной зависимости смещения платформы от силы, действующей в направлении вектора тяги. Калибровка тягомера выполняется непосредственно до и после каждого измерения тяги при помощи грузиков известной массы. Относительная погрешность измерения тяги при помощи описанного устройства не превышает 5%. Единичный импульс тяги $P_{ед}$ при этом рассчитывается как

$$P_{ед} = \frac{F}{f} \quad (1)$$

Полная масса рабочего тела, израсходованная за серию импульсов, и средний расход рабочего тела за импульс измеряются путем взвешивания шашек рабочего тела на высокочувствительных аналитических весах до и после серии из $10^3 - 10^4$ включений ИПД.

На основании измеренных параметров производится расчет остальных величин по известным соотношениям:

$$\eta_t = \frac{P_{ед}^2}{mCU^2}; \quad (2)$$

$$\langle V \rangle = \frac{P_{ед}}{m}; \quad (3)$$

$$C_t = \frac{CU^2}{2P_{ед}}, \quad (4)$$

где m – расход рабочего тела за один импульс;

C – емкость конденсаторного накопителя.

Типичная зависимость интегральных характеристик от энергии разряда приведена на рис. 4.

В рамках данной работы исследования распределения разрядного тока выполняются с помощью магнитозондового метода. Однако такие исследования для каналов рельсовой геометрии сталкиваются со значительными трудностями методического характера, поскольку обратная задача восстановления распределения тока по измеренным в нескольких точках значениям магнитной индукции представляет собой классический пример некорректной задачи математической физики, когда единственной заданной конфигурации магнитного поля соответствует бесконечное множество решений.

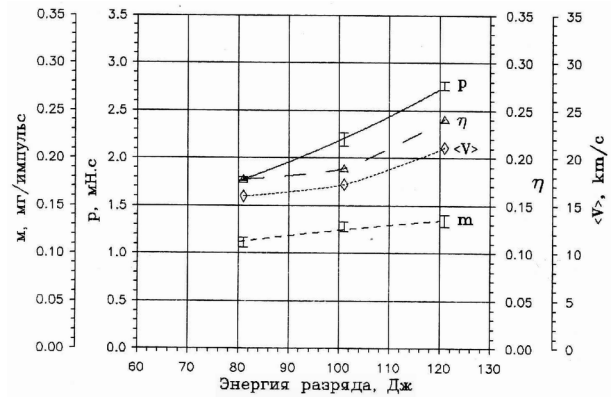


Рис. 4. Зависимость интегральных характеристик от энергии разряда

Простейшим частным случаем решения является расчет распределения линейной плотности разрядного тока $J_y(x)$ вдоль продольной оси ускорительного канала x в одномерном приближении. Такой расчет, основанный на экспериментально измеренных значениях магнитной индукции $B_z(x)_{exp}$, позволяет проследить развитие разряда и определить его влияние на интегральные характеристики двигателя.

Расчетная схема разрядных токов представлена на рис. 5. Здесь величина I соответствует полному разрядному току, h – расстоянию между электродами двигателя, x_0 – расстоянию от обратного токоподвода до обращенной к разряду поверхности торцевого изолятора, x – расстоянию, на котором чувствительность магнитного зонда еще позволяет уверенно регистрировать сигнал. Расчетная задача сводится к поиску такой функции линейной плотности разрядного тока $J_y(x)$, магнитное поле которой $B_z(x)$ наилучшим образом соответствовало бы экспериментально измеренному $B_z(x)_{exp}$.

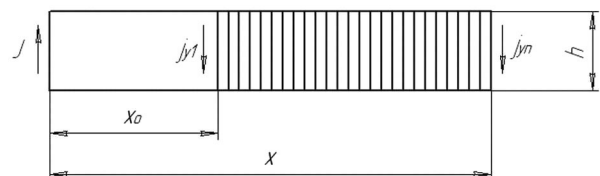


Рис. 5. Расчетная схема разрядных токов

Магнитная индукция B_{zj} в каждой точке x_j на оси ускорительного канала рассчитывается как сумма

магнитных индукций $B_{z_{ij}}$ от каждого i -го элемента расчетной схемы разрядных токов J_{y_i} :

$$B_{z_j} = \sum_{i=1}^n B_{z_{ij}}. \quad (5)$$

$B_{z_{ij}}$ рассчитывается по уравнению Био-Савара-Лапласа.

Вектор J_{y_i} представляет собой численный аналог функции $J_y(x)$. Расчет сводится к вариационной задаче нахождения вектора J_{y_i} , доставляющего минимум функционалу

$$S(J_{y_i}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{2(B_{z_j} - B_{z_{j\text{exp}}})}{B_{z_j} + B_{z_{j\text{exp}}}} \right)^2}, \quad (6)$$

где B_{z_j} – расчетное значение индукции;

$B_{z_{j\text{exp}}}$ – экспериментально измеренное значение индукции магнитного поля.

Это выражение имеет физический смысл средне-квадратичного отклонения расчетного значения от экспериментально измеренного, при следующем дополнительном условии:

$$\sum_{i=1}^n J_{y_i} = I, \quad (7)$$

где I – полный разрядный ток, измеренный поясом Роговского.

Математическая некорректность задачи нахождения функции распределения плотности тока $J_y(x)$ по измеренным значениям индукции магнитного поля $B_z(x)_{\text{exp}}$ требует регуляризации численного решения, то есть включения в постановку задачи дополнительного требования, чтобы искомая функция $J_y(x)$ была достаточно гладкой. Стандартный прием состоит в добавлении к минимизированному функционалу $S(J_{y_i})$ малой регуляризирующей добавки так, что решается задача нахождения минимума функционала $S(J_{y_i}, \alpha_1, \alpha_2)$, равного

$$S(J_{y_i}, \alpha_1, \alpha_2) = \alpha_1 \cdot \int_0^x \left(\frac{dJ_y(x)}{dx} \right)^2 dx + \alpha_2 \cdot \int_0^x \left(\frac{d^2 J_y(x)}{dx^2} \right)^2 dx + S(J_{y_i}), \quad (8)$$

где $\alpha_1 > 0$ и $\alpha_2 > 0$ – параметры регуляризации.

Такая замена приводит к тому, что среди множества функций $J_y(x)$, почти не отличающихся друг от друга по значениям $S(J_{y_i})$, предпочтение отдается более гладкой, имеющей меньшее значение $S(J_{y_i}, \alpha_1, \alpha_2)$.

Данная вариационная задача численно реализована при помощи метода локальных вариаций.

Была собрана схема магнитозондовых измерений в ускорительном канале ИПД, представленная на рис. 6.

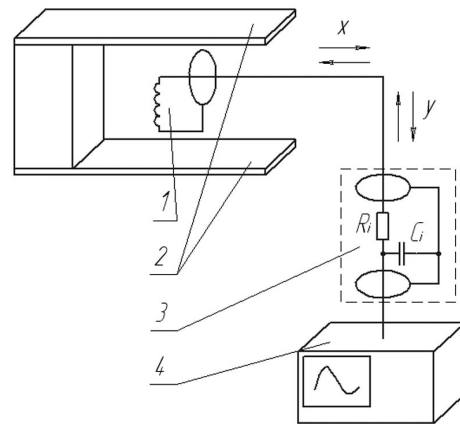


Рис. 6. Схема магнитозондовых измерений:

- 1 – магнитный зонд;
- 2 – электроды;
- 3 – интегратор;
- 4 – осциллограф

Используется магнитный зонд индуктивного типа, помещенный в керамическую трубку с внешним диаметром 2,5 мм. В процессе калибровки и отладки схемы зонд перемещался вдоль средней линии (оси) канала. На этой линии присутствует только одна компонента индукции магнитного поля $B_z(x)$, что значительно облегчает калибровку магнитного зонда. Для перемещения зонда используется специально разработанное дистанционно управляемое координатное устройство с двумя степенями свободы, обеспечивающее высокую точность фиксации положения зонда. Шаг перемещения составляет 5 мм. Осциллограммы сигнала с магнитного зонда регистрируются запоминающим цифровым осциллографом. Магнитный зонд связан с осциллографом коаксиальной кабельной линией с RC-интегратором.

Типичное изменение распределения разрядного

тока в межэлектродном пространстве по времени показано на рис. 7.

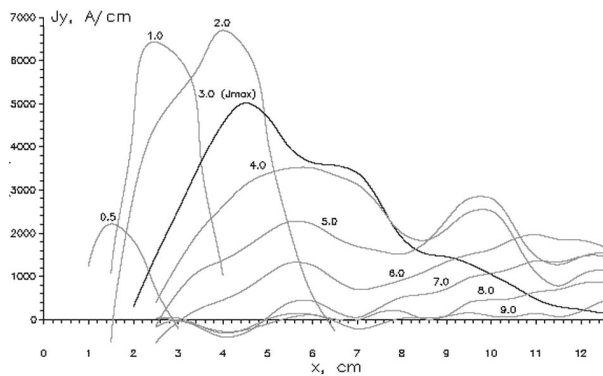


Рис. 7. Распределения разрядного тока

4. Автоматизация эксперимента

Для повышения эффективности работ по созданию и испытанию лабораторной модели ИПД была введена система автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных. Система базируется на использовании персонального компьютера (PC). Реализованная на настоящий момент схема показана на рис. 8.

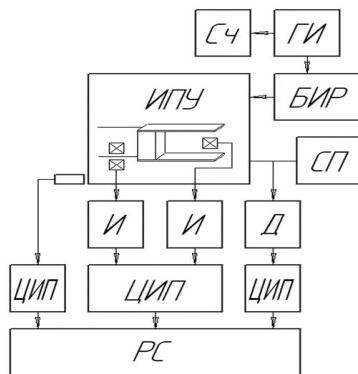


Рис. 8. Схема системы автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных

Как видно, срабатывание стендового блока инициирования разряда (БИР) происходит под действием генератора импульсов (ГИ). Число импульсов фиксируется с помощью счетчика (Сч). Далее интересующие сигналы через делитель (Д), интеграторы (И) или напрямую поступают на цифровые измерительные приборы (ЦИП). Информация с большинства ЦИП передается через интерфейс RS-232 на PC, на экране которого отображается в удобном для восприятия виде. Из-за ограничения пропускной

способности шины RS-232 и достаточно большой частоты следования исследуемых сигналов, использование приборов, работающих через этот интерфейс, ограничено условием одновременной работы только одного канала. В противном случае, при использовании нескольких каналов, данные не успевают поступать в PC. Для решения этой сложности в комплексе также используется осциллограф, передающий данные по шине LPT. В системе используется собственное программное обеспечение, позволяющее оперировать с получаемыми данными, производить расчет интересующих параметров по изложенной выше методике и сохранять получаемые результаты. Кроме того, на PC можно частично возложить функции контроля эксперимента.

Работа проведена на средства гранта Т02-14.0-762 Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. – М., Машиностроение, 1973. – 320 с.
2. Тихонов В.Б., Арсенин Ю.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1978. – 436 с.
3. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. – М.: Наука, 1988. – 186 с.
4. Antropov N., Gomilka L., Diakonov G., Krivososov I., Popov G., Orlov M. Parameters of plasmoids injected by PPT // Proceedings of the 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-96-2736, Seattle, USA, 1997.
5. Popov G., Antropov N., Diakonov G., Orlov M., Tyutin V., Yakovlev V. Experimental Study of Plasma Parameters in High-Efficiency Pulsed Plasma Thrusters // Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-163, Pasadena, USA, 2001.

Поступила в редакцию 28.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Назаренко, Московский авиационный институт (Государственный технический университет) МАИ, Москва.