

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ ПРИ ЗАПУСКЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ СПД-140Д

Ермошкин Ю.М.¹, Галайко В.Н.², Ким В.П.³, Кочев Ю.В.¹, Меркурьев Д.В.³, Остапущенко А.А.², Попов Г.А.³, Смирнов П.Г.³, Шилов Е.А.³, Якимов Е.Н.¹

¹ Информационные спутниковые системы,
ИСС, ул. Ленина, 62, Железнодорожный район, Красноярский край, 862972, Россия

² Научно-производственный центр «Полюс»,
НПЦ «Полюс», проспект Кирова, 56в, Томск, 634050, Россия

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: riame4@sokol.ru

Представлены результаты исследования переходных процессов в разрядной цепи при запусках двигателя СПД-140Д разработки опытного конструкторского бюро «Факел» при его работе с системой преобразования и управления (СПУ), разработанной научно-производственным центром «Полюс». Поскольку основной разряд в СПД является мощным потребителем энергии бортовой системы электропитания, необходима организация запуска двигателя, обеспечивающая достаточно мягкий выход разрядных параметров двигателя на номинальный режим. Полученные результаты позволили разработать имитационную модель разряда и имитатор двигателя СПД-140Д как электрической нагрузки. Кроме того, выявлены особенности изменения разрядных параметров, представляющие научный интерес. В статье приводится описание отмеченных особенностей и их обсуждение.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель (СПД), система преобразования и управления (СПУ), режимы работы СПД, запуск двигателя, переходные процессы в разрядной цепи.

Введение

Стационарные плазменные двигатели разработки опытного конструкторского бюро (ОКБ) «Факел» успешно используются в системах коррекции орбит как отечественных, так и зарубежных космических аппаратов (КА) [1, 2]. Принцип их действия и характеристики подробно описаны в работах [2–4]. Наибольшую мощность, тягу и подтвержденный испытаниями ресурс имел двигатель СПД-100 мощностью 1350 Вт [2, 3]. К настоящему времени в ОКБ разработан и готов к применению двигатель СПД-140Д с номинальной мощностью 4,5 кВт и тягой около 290 мН, работающий при разрядном напряжении 300 В и обеспечивающий получение удельного импульса тяги около 1750 с [5]. Этот двигатель будет использоваться для доведения КА повышенной массы на ГСО, возможно также его последующее использование и для маневрирования КА на рабочей орбите. Поскольку основной разряд в СПД является одним из мощных потребителей энергии бортовой системы электропитания (СЭП), было осуществлено исследование переход-

ных процессов в разрядной цепи при питании двигателя СПД-140Д от системы преобразования и управления СПУ-140Д, разработанной НПЦ «Полюс». Полученные данные были использованы при разработке имитационной модели названных переходных процессов и имитатора двигателя как электрической нагрузки. Несмотря на то, что работа носила прикладной характер, ряд полученных результатов представляет научный интерес. Ниже приводится краткое описание методики и наиболее интересных результатов этого исследования.

Краткое описание двигателя СПД-140Д и функций системы преобразования и управления

Двигатель СПД-140Д выполнен по схеме, традиционной для современных СПД [3], а именно:

— его магнитная система содержит наружные и внутреннюю катушки намагничивания, полюсы и магнитопроводящие элементы, формирующие необходимую топологию магнитного поля в разряде, при этом все катушки соединены последовательно

и питаются независимо от отдельного источника питания в СПУ;

— разрядная камера выполнена из борнитридной керамики, и в ней выполнен кольцевой, открытый в выходной части ускорительный канал с наружным диаметром 140 мм и внутренним диаметром 100 мм;

— анод-газораспределитель размещен внутри ускорительного канала, а полый катод или катоды (если их два) размещаются вне ускорительного канала (рис. 1).

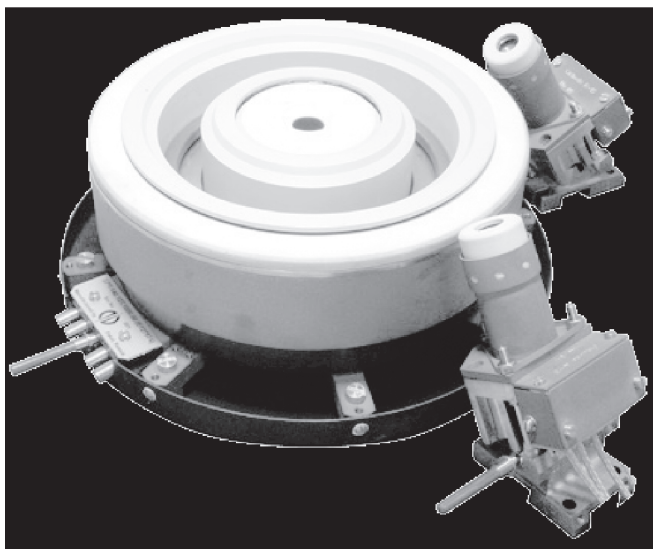


Рис. 1. Общий вид двигателя СПД-140Д

Основной разряд, в котором ионизируются движущиеся в ускорительном канале атомы рабочего вещества и ускоряются полученные ионы, зажигается и поддерживается постоянным напряжением, приложенным между анодом и катодом

Двигатель испытывался при работе с СПУ в составе двигательного блока (ДБ), содержащего, кроме двигателя, блок газораспределения, через который подавался ксенон в выбранный катод и в ускорительный канал через анод-газораспределитель. Для зажигания разряда в катод эмиттер электронов, выполненный из гексаборида лантана, подогревался, и разряд инициировался подачей поджигающих импульсов напряжения между эмиттером и поджигающим электродом. После зажигания разряда в катод зажигался основной разряд.

Следует отметить, что ранее результаты исследования переходных процессов при запуске СПД публиковались мало. Применительно к двигателю СПД-140Д некоторые результаты таких исследований при запуске двигателя на работу с разрядным напряжением 800 В были опубликованы в [5]. В данном случае изучались процессы при настройках СПУ для работы с установившимися разрядными

напряжениями 280—315 В после завершения процесса запуска.

При запуске двигателя СПД-140Д использовалась типовая для СПД циклограмма, которая сводилась к следующему. Запуск двигателя начинался с выбора катода и коммутации всех цепей в СПУ для работы с выбранным катодом. После выбора катода начиналась подготовка двигателя к запуску включением источников питания накала катода, катушек намагничивания и регулятора расхода на дежурный режим. Через 150 с после начала нагрева катода осуществлялась подача с пульта управления команды на включение источников разрядного напряжения, импульсов напряжения для поджига разряда в катод и источника питания клапанов подачи ксенона в двигатель.

После открытия клапанов подачи ксенон поступал в выбранный катод и через анод — в разрядную камеру двигателя. По мере увеличения давления в рабочей полости катода и в разрядной камере зажигался разряд сначала в катод, а затем — в разрядной камере. Повышение разрядного напряжения СПУ осуществляла со скоростью порядка 1 В/(м·с) с некоторой задержкой во времени по отношению к началу подачи импульсов поджигающего напряжения. Поэтому зажигание основного разряда происходило со сдвигом во времени по отношению к началу подачи импульсов поджигающего напряжения.

После зажигания основного разряда с пульта управления работой СПУ отключались нагрев катода, подача импульсов поджигающего напряжения, и регулятор расхода переводился из дежурного в рабочий режим, в котором он осуществлял постепенное увеличение расхода до номинального и стабилизировал разрядный ток на уровне 15 А.

Методика исследования

Для регистрации процессов в разрядной цепи использовалась система регистрации быстропротекающих процессов на базе осциллографов типа Keysight DSOS254 и Tektronix MDO4054C (частота сбора данных до 2,5 ГГц и 500 МГц соответственно). Изменения во времени разрядного напряжения регистрировались с помощью дифференциального пробника фирмы Keysight, подключавшегося на входе в вакуумную камеру к выводам от катодов и от анода, а разрядный ток — токовым пробником той же фирмы Keysight, подключавшимся также на входе в вакуумную камеру на неэкранированном участке линии питания основного разряда (рис. 2).

Методика исследования сводилась к следующему: двигатель запускался в работу, и осуществлялась регистрация осциллограмм изменения разряд-

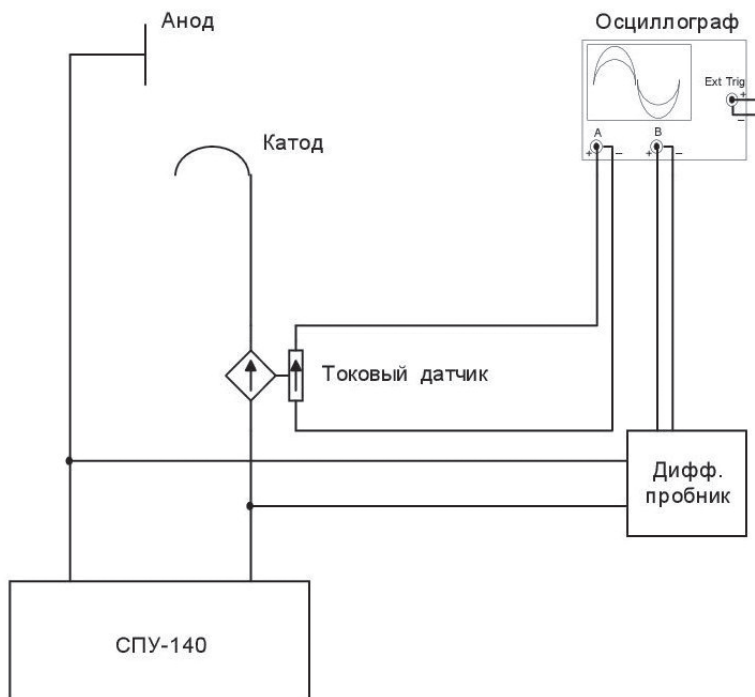


Рис. 2. Схема осциллографирования разрядных параметров

ных параметров при запуске во времени с разными моментами старта и длительностью записи с целью выявления общих особенностей переходных процессов в разрядной цепи питания ДБ на различных стадиях развития разряда в двигателе. Осуществлялась также регистрация осциллограмм разрядных параметров в разрядной цепи на установившихся режимах работы в начале работы двигателя после запуска и после непрерывной работы двигателя в течение 1 часа и трех часов с целью выявления зависимости характеристик колебаний разрядных параметров от теплового состояния двигателя.

Запуски двигателя осуществлялись при «холодном», «теплом» и «горячем» двигателе. Окончанием запуска считался выход разрядного тока на заданное значение 15 А. «Холодным» далее называется двигатель, который запускался после его охлаждения в вакууме в течение 3 и более часов после предыдущего запуска. «Теплым» и «горячим» называется двигатель, проработавший 1 час и 3 часа соответственно, запускавшийся после паузы 20 мин для охлаждения катода.

Основные результаты исследования процесса зажигания основного разряда

Общее описание переходных процессов в разрядной цепи при запуске двигателя

Характер изменения переходных процессов в разрядной цепи при зажигании основного разряда в целом повторялся при запусках двигателя при

разных разрядных напряжениях и разных тепловых его состояниях. Эти процессы можно разбить на несколько стадий (рис. 3):

- низковольтная стадия 1, когда разрядное напряжение и величина разрядного тока возрастают с небольшой скоростью во времени и незначительны по величине;
- стадия 2 — переход в сильноточную форму разряда;
- стадии 3—6 — повышение напряжения до заданного при малом изменении среднего значения тока;
- стадия 7 — увеличение разрядного тока за счет работы регулятора расхода при значении напряжения, близком к установившемуся (на приведенной осциллограмме эта стадия не попала в кадр).

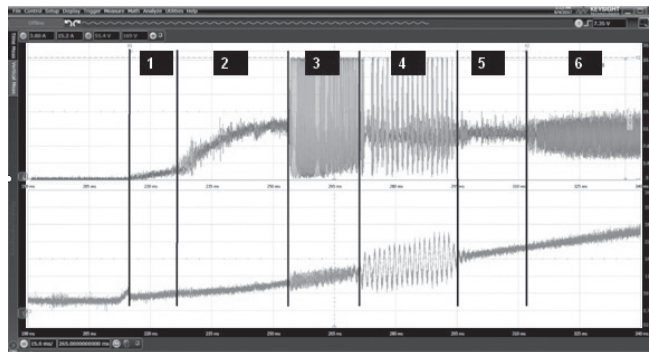


Рис. 3. Изменение разрядных параметров при запуске двигателя с установившимся после запуска разрядным напряжением 300 В (верхний луч — разрядный ток, нижний — разрядное напряжение)

Изменение разрядных параметров на стадии 7 можно проследить на рис. 4, где приведены осциллограммы разрядных параметров при большей длительности развертки. Видно, что на завершающей части этой стадии регулятор расхода в СПУ начал работать для поддержания среднего значения разрядного тока постоянным.

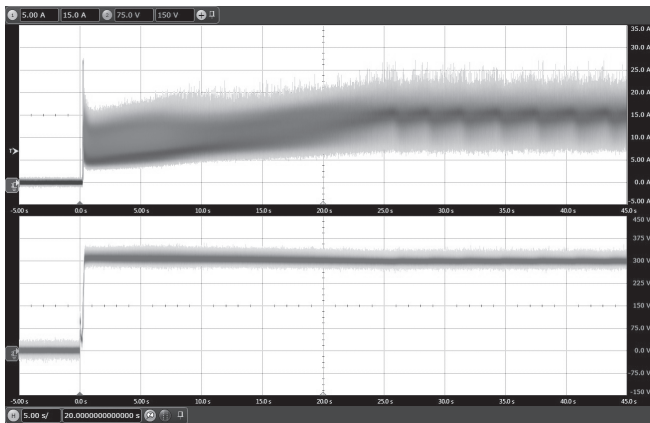


Рис. 4. Осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и разрядного напряжения (нижний луч) при запуске «холодного» двигателя с установившимся разрядным напряжением 300 В

К сказанному следует добавить, что независимо от значения напряжения зажигания основного разряда процесс начинается с броска тока — начала стадии 1, максимум которого составлял около 28 А и ограничивался СПУ (рис. 5). Этот бросок приводил к кратковременной и значительной просадке напряжения (см. нижний луч на рис. 5).

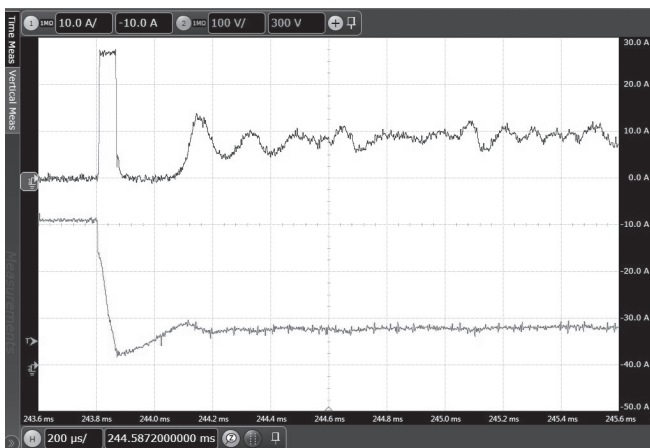


Рис. 5. Осциллограмма первого броска тока (верхний луч) и напряжения (нижний луч) при зажигании основного разряда с установившимся разрядным напряжением 300 В

При этом представляет интерес то, что после зажигания разряда при разных напряжениях значения тока и напряжения после зажигания разряда

попадают на одни и те же зависимости этих параметров от времени (рис. 6, 7).

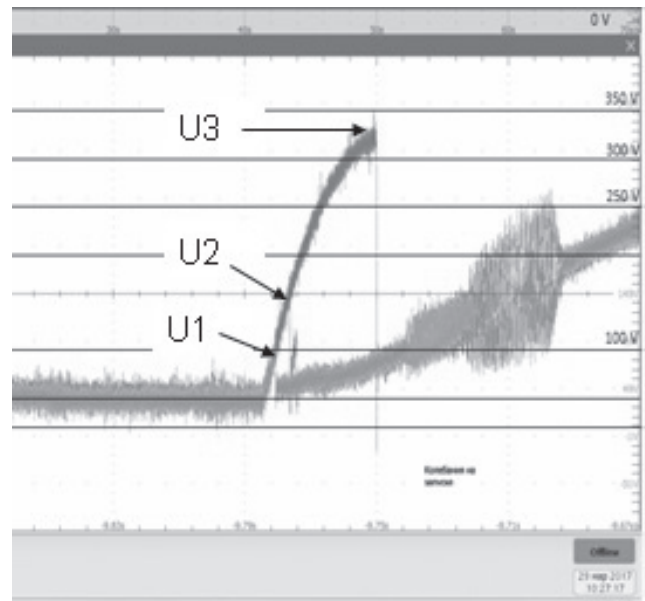


Рис. 6. Осциллограммы напряжения разряда от времени при трех разных запусках, происходивших с разными напряжениями зажигания U_1 , U_2 , U_3

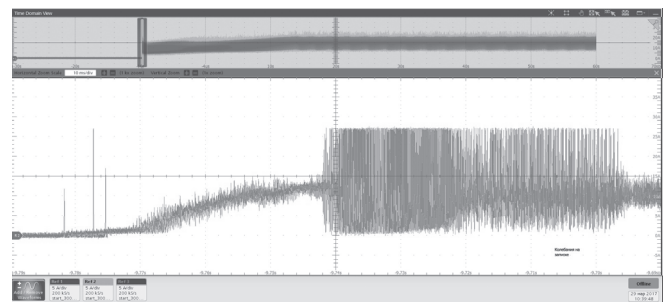


Рис. 7. Осциллограммы разрядного тока при трех разных запусках с установившимся разрядным напряжением 300 В, в которых основной разряд зажигался при разных напряжениях

Это свидетельствует о том, что разряд во всех случаях развивался практически по одной и той же динамической вольт-амперной характеристике (ВАХ).

Основные особенности переходных процессов в разрядной цепи

1. *Стадия 1* отличается тем, что на этом участке ток возрастает с увеличением напряжения с относительно небольшой скоростью, а для *стадии 2* характерно более быстрое нарастание тока и выход его на максимальные значения при незначительном уровне колебаний (см. рис.3).

2. Для *стадий 3* и *4* характерен высокий уровень колебаний (см. рис. 3). При этом на стадии 3 ко-

лебания имеют регулярный характер и частоту порядка 6—7 кГц; на стадии 4 характер колебаний изменяется, а именно колебания разрядного тока происходят примерно с той же частотой, что и на участке 3, но они промодулированы второй модой колебаний с частотой порядка 800 Гц (рис. 8), причем на стадии 4 названная низкочастотная мода колебаний отчетливо проявляется и в колебаниях напряжения со значительной амплитудой, что свидетельствует об активном участии элементов разрядной цепи в этих колебаниях. Поэтому колебания на этом участке можно отнести к так называемым «контурным», параметры которых должны зависеть от электротехнических параметров разрядной цепи и могут управляться ими.

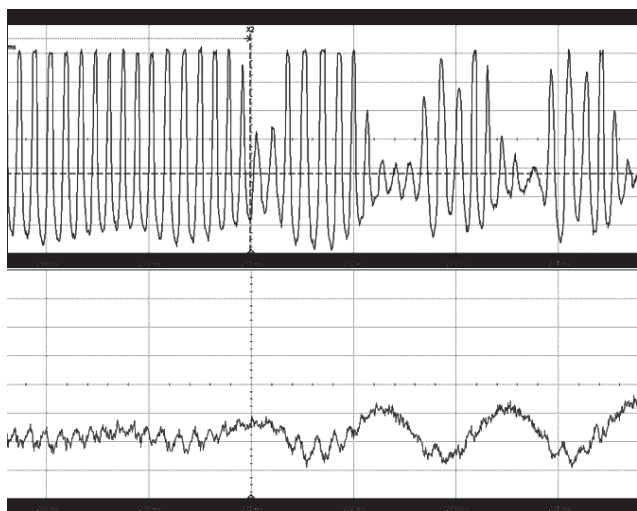


Рис. 8. Часть осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и разрядного напряжения (нижний луч) в момент перехода от стадии 3 к стадии 4

3. На *стадии 5*, соответствующей диапазону напряжений 200—280 В, интенсивные колебания пропадают. Переход от стадии 4 к стадии 5 можно проследить на рис. 9. Из рисунка видно, что увеличение напряжения приводит к снижению интенсивности как более высокочастотной составляющей, так и «контурных» колебаний.

4. *Стадия 6* характерна невысоким уровнем интенсивности колебаний, а *стадия 7* — развитием колебаний с более высокой частотой (порядка 8—9 кГц).

5. Дальнейшее повышение разрядного напряжения на стадии 6 приводит к развитию более высокочастотных колебаний с достаточно большой амплитудой разрядного тока и малой амплитудой колебаний напряжения и еще большей частотой (в приведенном примере амплитуды составляют величины порядка 5 А и 15 кГц соответственно при среднем значении тока порядка 8—9 А (рис. 10).

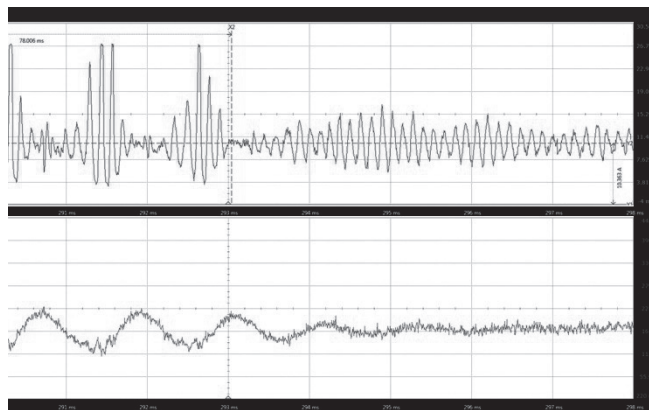


Рис. 9. Изменение разрядных параметров при переходе от стадии 4 к стадии 5

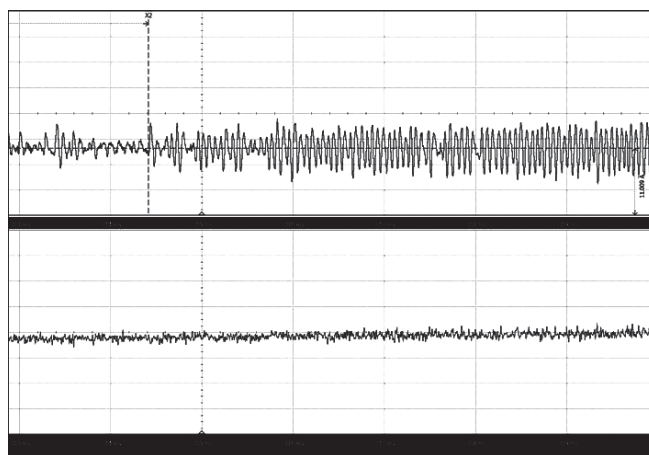


Рис. 10. Изменение колебаний разрядных параметров при переходе от участка 5 к участку 6 (верхний луч — разрядный ток, нижний — разрядное напряжение)

Представляет интерес также то, что примерно через 1 минуту после выхода системы двигатель + СПУ на номинальный режим работы с разрядным напряжением 300 В колебания разрядного тока имеют много составляющих и широкий спектр (рис. 11), в котором трудно выделить доминирующую моду колебаний.

Поэтому для более четкого определения частотных характеристик колебаний использовались более длинные записи осциллограмм, которые позволяли проводить спектральный анализ при большем объеме информации, накапливаемой осциллографом. Оказалось, что частоты названных доминирующих мод колебаний практически одинаковы в осциллограммах разрядных параметров. Поэтому ниже приведены данные обработки только осциллограмм тока.

Колебания разрядного тока на установившихся режимах имеют двойной размах, сопоставимый со средним значением тока, составившим 15 А (рис. 12 и 13). На осциллограммах тока прорабатываются колебания, обусловленные работой регуля-

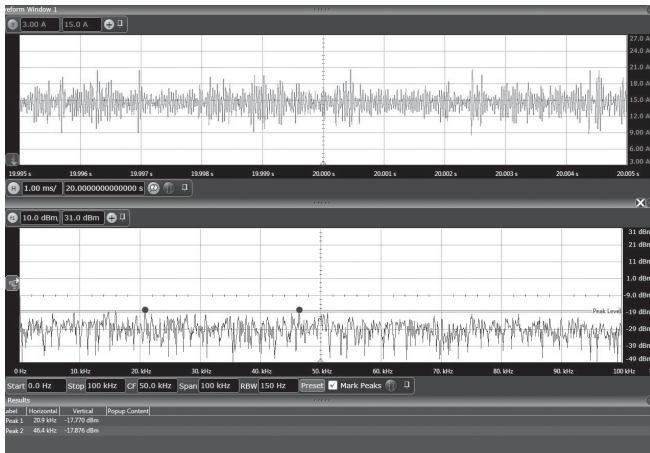


Рис. 11. Осциллограмма (верхний рисунок) и частотный спектр колебаний (нижний рисунок) разрядного тока примерно через 1 минуту после запуска

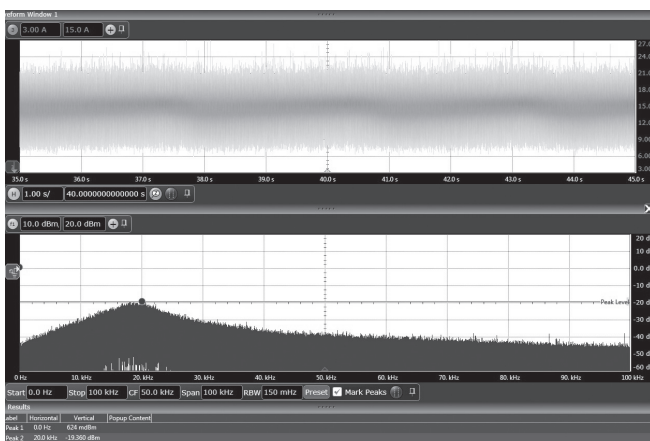


Рис. 12. Осциллограмма и частотный спектр колебаний разрядного тока через 1 минуту после запуска двигателя

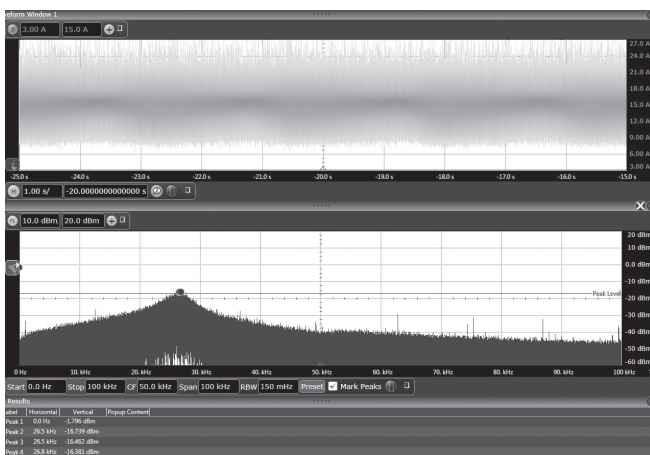


Рис. 13. Осциллограмма и частотный спектр колебаний разрядного тока через 1 час работы двигателя

тора расхода термодросселя, а в частотном спектре — ионизационно-пролетные колебания с частотой порядка 20 кГц при холодном двигателе (рис. 12).

После работы двигателя в течение 1 часа частота колебаний возрастает примерно до 27 кГц (рис. 13) и далее мало изменяется при увеличении наработки до 3 часов. Таким образом, отчетливо прослеживается влияние нагрева двигателя на частоту доминирующей моды колебаний на установленном режиме работы.

Как уже отмечалось, приведенные данные использовались при разработке имитационных моделей изменения разрядных параметров. В научном плане выделенные особенности отражают влияние режимов работы на характеристики колебаний и многообразии форм этих колебаний. Новизна их состоит в том, что в рассматриваемом случае получены данные о развитии этих колебаний во времени.

Анализ полученных результатов

В силу отмеченной сложности происходящих при запуске двигателя процессов и отсутствия данных об изменении локальных параметров плазмы в процессе зажигания основного разряда сложно провести полноценный физический анализ полученных данных. Поэтому ниже будет приведено лишь несколько качественных выводов о происходящих процессах, которые сводятся к следующему.

1. То, что после зажигания разряда при разных напряжениях зависимости тока разряда и напряжения разряда попадают практически на одни и те же зависимости от времени, означает, что ток разряда можно однозначно связать с напряжением разряда независимо от того, при каком напряжении произошло зажигание разряда, т.е. динамическую вольт-амперную характеристику разряда можно считать неизменной при всех запусках двигателя. Ее можно построить по полученным осциллограммам, усредняя значения токов на колебательных режимах работы. Результат такого построения представлен на рис. 14.

Эта усредненная динамическая характеристика (УДВАХ) оказывается близкой к «статической» ВАХ, получаемой по точкам при медленном изменении разрядного напряжения и сопоставимых расходах ксенона. Близость «статической» ВАХ и УДВАХ можно объяснить тем, что время повышения разрядного напряжения при запусках было достаточным для того, чтобы параметры плазмы успевали почти полностью перестраиваться при каждом напряжении к состоянию, реализующемуся при медленном снятии «статической» ВАХ.

2. С использованием представленной УДВАХ можно понять и характер изменения тока на разных стадиях разряда. Так, на стадии 1 ионизация потока еще незначительна и можно предположить, что разрядный ток определяется в основном пере-

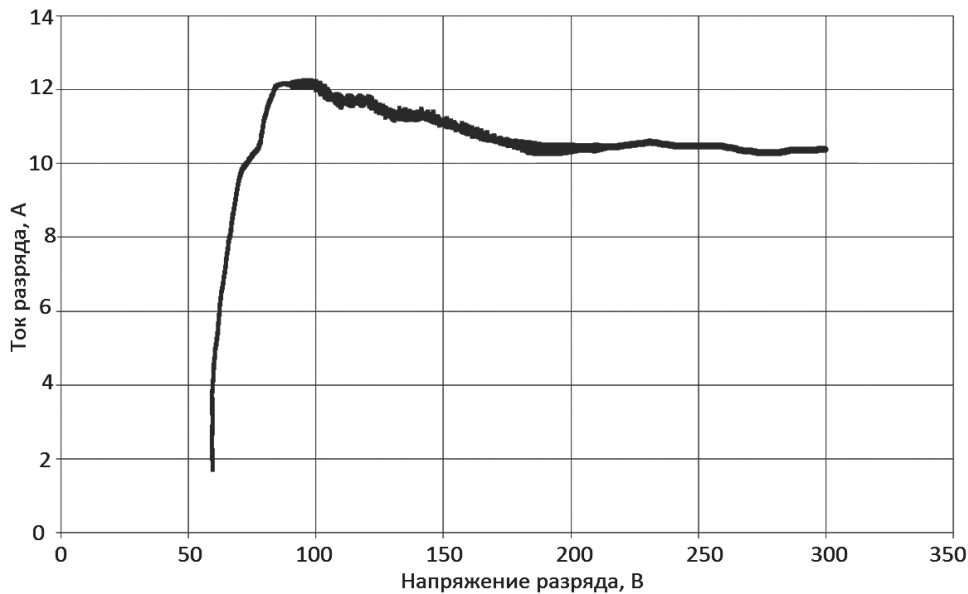


Рис. 14. Усредненная динамическая ВАХ двигателя

носом электронов из катода к аноду в потоке почти полностью нейтрального газа, движущегося в ускорительном канале, при слабом размножении электронов в канале из-за малой энергии электронов при низких разрядных напряжениях. Поэтому ток разряда незначителен. При этом рост тока можно объяснить тем, что с увеличением разрядного напряжения возрастают напряженность E электрического поля, скорость дрейфа электронов E/B и концентрация плазмы n_e , где B — индукция магнитного поля. Соответственно, должна возрастать и плотность электронного тока поперек магнитного поля: $j_{ez} = (\omega_e \tau_e)^{-1} n_e e E / B$ [3]. Параметр Холла $(\omega_e \tau_e)$ в данном случае можно считать зависящим лишь от напряженности электрического поля и концентрации атомов. Действительно, индукция магнитного поля и циклотронная частота $\omega_e = eB/m$ постоянны, а

$$\tau_e = \tau_{ea} = 1/v_{ea} = 1 / \langle \sigma_{ea} V_e \rangle n_a,$$

где e , m , τ_{ea} , $\langle \sigma_{ea} V_e \rangle$, n_a — заряд и масса электрона, время между столкновениями электронов с атомами, коэффициент скорости столкновений электронов с атомами и концентрация атомов соответственно.

Концентрацию атомов на рассматриваемой стадии можно также считать постоянной, а коэффициент скорости ионизации должен возрастать с увеличением E . Поэтому τ_{ea} и $(\omega_e \tau_e)$ должны убы-

вать с повышением E , что также должно приводить к возрастанию электронного тока.

На стадии 2 ионизация становится значительной и разряд проходит низковольтную часть ВАХ, на которой ток с увеличением напряжения быстро возрастает до максимального значения. Согласно исследованиям, на этой стадии перенос электронов поперек магнитного поля может усиливаться развитой азимутальной неустойчивостью плазмы, характерной для низких напряжений разряда [6]. На стадиях 3—6 разряд переходит в форму, характерную для нормальных ускорительных режимов, когда роль названной азимутальной неустойчивости снижается и сопротивление плазмы оказывается достаточно большим. При этом средние значения тока на отдельных участках «статической» ВАХ уменьшаются с увеличением разрядного напряжения, что получено и в представленной выше УДВАХ.

3. Из приведенных осциллограмм видно, что интенсивные колебания разрядного тока, в том числе совместно с колебаниями разрядного напряжения, развиваются на стадиях 3 и 4, где имеются участки УДВАХ с уменьшающимся током по мере увеличения напряжения, т.е. на участках с отрицательным сопротивлением нагрузки. Это соответствует известным представлениям об устойчивости работы источника с такой нагрузкой. То, что на участке 3 колебания разрядного напряжения малы, а на участке 4 — значительны, можно объяснить тем, что разрядная цепь реагирует различным образом на развивающиеся колебания, так как от ее параметров зависят определенные резонансные частоты. При переходе на установившийся режим на-

блюдаются характерные для СПД колебания ионизационной природы с частотами порядка 15—30 кГц. К сказанному следует добавить, что на участке 4 вследствие низкочастотных «контурных» колебаний разряд попадает то в область пониженных напряжений, где реализуются условия для развития колебаний с частотой порядка 6—7 кГц, то в область повышенных напряжений, где разряд более устойчив к этим колебаниям. Соответственно, колебания с частотой 6—7 кГц развиваются при понижении разрядного напряжения вследствие низкочастотной модуляции разрядного напряжения и попадании в область их существования. А при уходе из этой области при повышении разрядного напряжения они гаснут. Инкремент развития колебаний с частотой 6—7 кГц очень большой, так как амплитуда их нарастает до максимальной величины за время порядка их периода, что составляет около 0,15 мс.

4. Представляет интерес также увеличение по мере непрерывной работы двигателя частоты доминирующей моды колебаний с частотой порядка 20—30 кГц, регистрируемых обычно при работе СПД на стационарном режиме. Эти колебания ассоциируются с ионизационно-пролетными колебаниями, механизм которых был впервые предложен в [7]. Объяснить увеличение частоты выделенных колебаний можно тем, что с ростом температуры разрядной камеры увеличивается скорость V_a нейтральных атомов, определяющая пролетное их время $\tau_{fl} = L/V_a$ через слой ионизации и ускорения (СИУ) с толщиной L . Как показано в [7], частота этих колебаний $f \approx 1/\tau_{fl}$. Поэтому при постоянной толщине СИУ увеличение скорости атомов должно приводить к увеличению частоты ионизационно-пролетных колебаний. Так, при росте температуры разрядной камеры от комнатной до 500—600 °С скорость атомов может возрасти примерно в 1,6—1,7 раза, т.е. примерно во столько же раз должна была измениться частота. Наблюдаемое увеличение частоты в рассматриваемом случае происходило примерно от 15—20 кГц до 27 кГц, т.е. в 1,35—1,8 раз, что удовлетворительно согласуется с данной выше оценкой. Таким образом, приведенное объяснение можно признать приемлемым.

Выводы

В результате выполненного исследования получен ряд новых результатов, которые использованы для построения имитационных моделей процессов в разрядной цепи и разработки электрического имитатора двигателя. Некоторые из них представ-

ляют собой и научный интерес. К их числу можно отнести то, что при зажигании основного разряда повышением напряжения со скоростью порядка 1 В/мс разрядные параметры изменяются в соответствии с динамической вольт-амперной характеристикой разряда в двигателе, близкой к статической. Кроме того, получены данные, позволившие выявить условия развития колебаний в разрядной цепи питания двигателя при разных разрядных напряжениях и их зависимость от времени работы двигателя после его запуска.

Работа выполнена в Московском авиационном институте при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора на выполнение комплексного проекта № 02.G25.31.0196 от 27 апреля 2016 г. между Министерством и акционерным обществом «Информационные спутниковые системы».

Библиографический список

1. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А. СПД работают в космосе // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277-292.
2. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 291 с.
3. Ким В.П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 3. С. 45-59.
4. Ким В.П., Грдличко Д.П., Меркурьев Д.В., Смирнов П.Г., Шилов Е.А. Исследование характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высокими разрядными напряжениями // Вестник Московского авиационного института. Т. 22. № 4. 2015. С. 53-66.
5. Бойкачев В.Н., Гусев Ю.Г., Жасан В.С., Ким В.П., Мартынов М.Б., Мурашко В.М., Нестерин И.М., Пильников А.В., Попов Г.А. О возможности создания электроракетной двигательной установки мощностью 10...30 кВт на базе двухрежимного двигателя СПД-140Д // Космическая техника и технологии. 2014. № 1(4). С. 48-59.
6. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А. Азимутально-несимметричные колебания и аномальная проводимость в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) // Журнал технической физики. 1973. Т. XLIII. № 5. С. 972-982.
7. Ким В. О влиянии эффектов запаздывания на развитие низкочастотных колебаний в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов // Источники и ускорители плазмы: Межвуз. темат. сб. науч. тр. — Харьков: ХАИ, 1980. Вып. 4. С. 47-53.

SPECIFICS OF TRANSIENTS IN THE DISCHARGE CIRCUIT DURING THE SPT-140D PLASMA ENGINE STARTING

Ermoshkin Yu.M.¹, Galaiko V.N.², Kim V.P.³, Kochev Yu.V.¹, Merkur'ev D.V.³,
Ostapushenko A.A.², Popov G.A.³, Smirnov P.G.³, Shilov E.A.³, Yakimov E.N.¹

¹ Satellite Information Systems,

SIS, 62, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 862972, Russia

² Scientific-Productional Centre "Polus",

SPC "Polus", 56v, Kirova av., Tomsk, 634050, Russia

³ Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

e-mail: riame4@sokol.ru

Abstract

The article presents the results of transients' in discharge circuit studies during SPT-140D plasma thruster starting while its operation together with power processing unit (PPU). SPT-140D is an electric thruster developed by the Design Bureau "Fakel". This thruster was running on Xenon with the discharge voltage of 300 V and power of 4.5 kW, ensuring reactive thrust 280-290 mN and 1750 s specific impulse of thrust. At present, this thruster is ready for flight application for spacecraft motion control. The PPU unit was developed and manufactured by the Scientific and Production Center "Polus". Since the main discharge is one of the powerful PPU loads, the main attention was payed to the study of transients in the power supply circuit of the main discharge. The obtained data was used for the development of imitation model of the named transients and electric imitator of the thruster for off-line PPU optimization and testing without the thruster. In addition, the information on the specifics of the thruster operation was obtained. The most interesting among them are the following:

1. In the course of the thruster starting, after the main discharge ignition by the discharge voltage increasing with the rate of about 1 V/ms, the main discharge could ignite by various discharge voltages. Though after the discharge ignition its parameters during various start-ups vary according to one and the same averaged dynamic volt-ampere characteristic, close to the "static" characteristic obtained with slow voltage changing.

2. Various oscillation modes of the discharge parameters were revealed, arousing at the various stages of discharge voltage variation, and changing drastically with the small variation of the discharge voltage. It allows evaluate the increment of their build-up.

3. After reaching the nominal discharge parameters, the dominating discharge current oscillation mode frequency is 15-20 kHz. After an hour of continuous

operation it reaches the value of 27-27 kHz, and its further variation is insignificant. It can be explained by the discharge chamber heating resulting in Xenon atoms velocity increase, decrease of their drift time through the ionization layer and acceleration leading to the frequency increase according to ionization-drifting oscillations excitation model.

Thus, the employed methodology of the study is useful also for conducting physical research of the processes in the thruster.

Keywords: stationary plasma thruster (SPT), power processing unit (PPU), SPT operation modes, thruster starting, transients in the main discharge circuit.

References

1. Kozubskii K.N., Murashko V.M., Rylov Yu.P., Trifonov Yu.V., Khodnenko V.P., Kim V., Popov G.A., Obukhov V.A. *Fizika plazmy*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 277-292.
2. Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnye plazmennye dvigateli Morozova* (Morozov's Stationary plasma engines), Moscow, MAI, 2012, 291 p.
3. Kim V.P. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 85, no. 3, pp. 45-59.
4. Kim V.P., Grdlichko D.P., Merkur'ev D.V., Smirnov P.G., Shilov E.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 53-66.
5. Boikachev V.N., Gusev Yu.G., Zhasan V.S., Kim V.P., Martynov M.B., Murashko V.M., Nesterin I.M., Pil'nikov A.V., Popov G.A. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 1(4), pp. 48-59.
6. Morozov A.I., Esipchuk Yu.V., Kapulkin A.M., Nevrovskii V.A., Smirnov V.A. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1973, vol. XLIII, no. 5, pp. 972-982.
7. Kim V. *Mezhvuzovskii tematiceskii sbornik nauchnykh trudov "Istochniki i uskoriteli plazmy"*, Kharkov, 1980, no. 4, pp. 47-53.