

## РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье рассмотрен источник питания, предназначенный для электродуговых микродвигателей корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов. Источник имеет гальваническую развязку и обеспечивает высокую энергоэффективность при согласованной нагрузке. Конструкция содержит двухтактный преобразователь со средней точкой, который охвачен цепью обратной связи по выходному току. Включенная последовательно в цепь индуктивность сглаживает пульсации тока, сформированные широтно-импульсным модулятором. Отсутствие накопительного конденсатора в выходной цепи позволило обеспечить быстрый отклик для регулировки ширины импульса в соответствии с изменениями сопротивления нагрузки. Результаты экспериментов подтвердили теоретический расчет и моделирование. В режиме стабилизации тока выходная мощность источника составила 40–120 Вт при входном напряжении 12–18 В.

**Ключевые слова:** широтно-импульсная модуляция, силовая электроника, электродуговой микродвигатель, двухтактный преобразователь, хаотическая широтно-импульсная модуляция, дуговой разряд.

**Введение.** Созданные аммиачные корректирующие двигательные установки с электротермическими микродвигателями обладают удельным импульсом тяги до 250 с при потребляемой мощности до 100 Вт. Дальнейшее совершенствование аммиачных корректирующих двигательных установок связано с созданием электродугового микродвигателя (ЭДМД) с удельным импульсом тяги более 300 с, при энергопотреблении до 100 Вт.

В настоящее время разработкой ЭДМД занимаются в США, Германии, Китае и т.д. [1–4]. Практически все ЭДМД созданы для космических аппаратов большой массы с высоким энергопотреблением на ЭДМД. Проектирование ЭДМД с низкой потребляемой мощностью тесно связано с проектированием источника питания.

Управление ЭДМД малой мощности довольно широкое понятие, которое включает в себя набор сложных функций необходимых для стабильной работы в заданных режимах. Для достижения требуемых характеристик необходимо тщательное исследование, разработка силовой части преобразователя и системы управления. Следовательно, чтобы источник питания имел достаточно высокий уровень

удельной мощности, силовая часть должна работать на высокой частоте силовых транзисторов. Требования к маломощному источнику питания значительно отличаются от требований к источнику питания, предназначенному для мощных ЭДМД, тем, что для стабильной работы необходимо достаточно точно регулировать выходной ток и мощность.

При проектировании гальванически развязанного источника питания ЭДМД важным выбором является выбор топологии. Классический подход для проектирования основывается на требуемом уровне выходной мощности, которая направлена на поддержание стабильной работы ЭДМД. Помимо классического подхода влияют многие другие факторы, такие как размер, пульсации выходного напряжения, диапазон входного напряжения.

Размер источника питания ЭДМД зависит главным образом от размера трансформатора и количества используемых силовых транзисторов.

При разработке источника питания для ЭДМД были рассмотрены следующие топологии преобразователей: прямоходового, обратногоходового и двухтактного со средней точкой. Приведенные топологии источника питания ЭДМД можно клас-

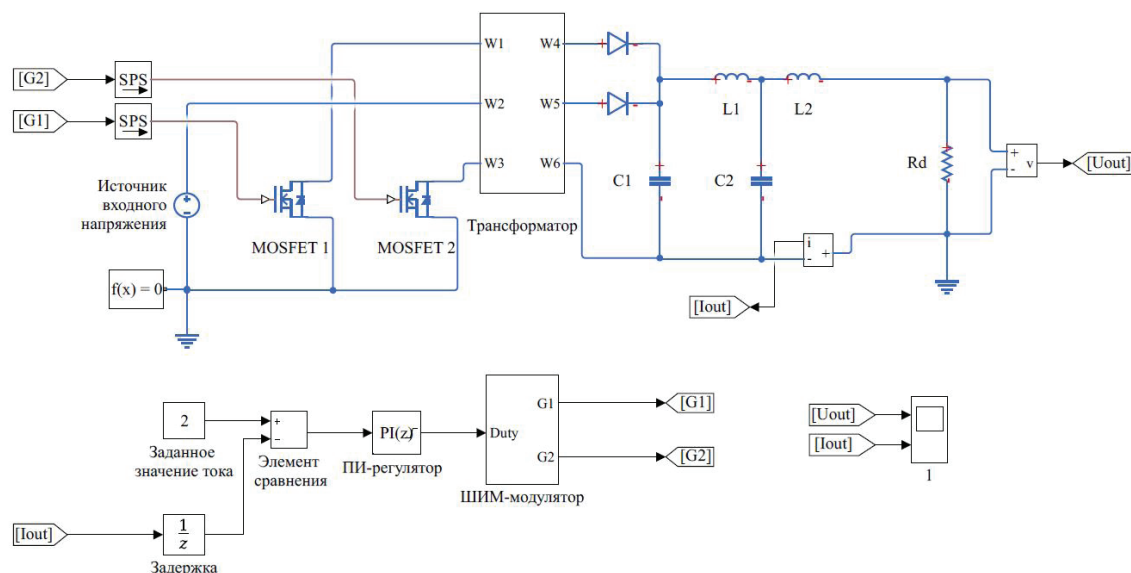


Рис. 1. Имитационная модель источника питания для ЭДМД

сифицировать как однотактные или двухтактные в зависимости от использования кривой намагничивания. Если во время работы преобразователь работает в одном квадранте кривой намагничивания, топология классифицируется как однотактная, на которой основаны прямоходовой и обратногоходовой источники питания. В противном случае, если преобразователь работает в двух квадрантах кривой намагничивания сердечника трансформатора, то топология классифицируется как двухтактная, на которой основан преобразователь со средней точкой.

Таким образом, выбранная двухтактная топология является наиболее оптимальной, позволяющая использовать сердечник трансформатора более эффективно. Из вышесказанного следует, что при разработке двухтактного преобразователя потребуются сердечник трансформатора меньшего размера по сравнению с однотактными преобразователями.

Процесс работы ЭДМД состоит из трех этапов:

1. Бесконтактное зажигание высоковольтным импульсом и установление основного устойчивого дугового разряда.
2. Поддержание разряда на заданном уровне выходного тока.
3. Прекращение работы ЭДМД.

Для обеспечения основного устойчивого дугового разряда необходимо разработать источник тока с крутопадающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Работа источника должна быть основана на принципе стабилизации и управления током дуги с помощью блока ШИМ и полупроводниковых транзисторов.

Известно, что режим горения дуги характеризуется силой тока  $I_{гуд}$ , напряжением  $U_{гуд}$  и длиной дуги, а также взаимосвязью между ними. Следовательно, дуговой разряд в ЭДМД как потребитель энергии и источник питания образуют взаимосвязанную энергетическую систему. Установлено, что напряжение дугового разряда при стабилизации зависит от расстояния между катодом и анодом и имеет линейный характер.

**Теоретическая часть.** Первая часть исследования была посвящена разработке имитационной модели в пакете MATLAB приложении Simulink, показанная на рис. 1.

Имитационная модель состоит из силового трансформатора, двухполупериодной схемы выпрямления, пропорционально-интегрального регулятора, устройства сравнения для задания выходного тока и ШИМ-регулятора, выходного фильтра и нагрузки в виде ЭДМД. С целью упрощения имитационной модели сопротивление ЭДМД ( $R_g$ ) было принято постоянным. Потому как реальная модель дуги ЭДМД достаточно сложна и должна включать физические и химические процессы, включая процессы конвекции, диффузии, ионизации и возбуждения, что является отдельной темой для исследования. Индуктивность вторичной обмотки высоковольтного трансформатора системы запуска ЭДМД учитывалась катушкой  $L_2$ .

Система запуска присутствует на опытном образце источника, но не включена в модель. Целью системы запуска является надежное включение основного дугового разряда через воздушный зазор ЭДМД. Замыкание цепи происходит путем перепрыгивания искры между катодом и соплом ЭДМД, что создает путь с низким сопротивлением для основного дугового разряда через ионизированный канал.

Чтобы получить ионизированный канал, необходимо приложить к зазору напряжение, превышающее потенциал пробоя.

Выходное напряжение источника питания электродугового двигателя определим по выражению:

$$U_{\text{вых}} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \gamma \cdot \eta_{\text{цсм}} \cdot U_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где  $w_1$ ,  $w_2$  — число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора,  $\gamma$  — коэффициент регулирования, поступающий на вход широтно-импульсного модулятора (ШИМ),  $\eta_{\text{цсм}}$  — КПД источника электродугового двигателя,  $U_{\text{вх}}$  — входное напряжение.

В режиме стабилизации ток, протекающий через дугу, пропорционален расходу рабочего тела. Источник питания электродугового двигателя гальванически развязан и способен работать в режиме стабилизации тока дуги [5].

Значение тока можно найти с помощью выражения:

$$I_{гyтu} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \gamma \cdot \eta_{ucm} \cdot \frac{U_{вyкx}}{R_g}, \quad (2)$$

где  $R_g$  — сопротивление дуги в установившемся режиме.

Таким образом, изменяя коэффициент заполнения  $\gamma$  — добиваемся стабилизации тока дуги.

Величину ошибки по выходному току как отклонение текущего значения тока от заданного определяем по следующему выражению:

$$\varepsilon(t) = I_0 - I_{гyтu}(t). \quad (3)$$

ПИ-регулятор поддерживает требуемый ток дуги  $I_{гyтu}$  с помощью изменения величины коэффициент заполнения  $\gamma$  ШИМ и определяется двумя слагаемыми:

$$\gamma = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt, \quad (4)$$

где  $k_p, k_i$  — коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора соответственно.

Продифференцируем правую и левую части выражения

$$\frac{d\gamma}{dt} = k_p \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + k_i \cdot \varepsilon(t), \quad (5)$$

полагая, что

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}}{dt}, \quad (6)$$

получим

$$\frac{\gamma_n - \gamma_{n-1}}{dt} = k_p \cdot \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}}{dt} + k_i \cdot \varepsilon_n, \quad (7)$$

$$\gamma_n = \gamma_{n-1} + k_p(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) + k_i \cdot \varepsilon_n \cdot dt.$$

Окончательно получим:

$$\gamma_n = \gamma_{n-1} + (k_p + k_i \cdot dt) \cdot \varepsilon_n - k_p \cdot \varepsilon_{n-1}, \quad (8)$$

где  $\gamma_n$  — значение ШИМ на текущем шаге  $n$ ;  $\gamma_{n-1}$  — значение ШИМ на предыдущем шаге  $n-1$ ;  $\varepsilon_n$  — ошибка по выходному току на текущем шаге  $n$ ;  $\varepsilon_{n-1}$  — ошибка по выходному току на предыдущем шаге  $n-1$ .

ШИМ-регулятор имитационной модели для MOSFET1 ( $M_1$ ) и MOSFET2 ( $M_2$ ) описывается следующими выражениями [6, 7].

Треугольная форма несущей частоты ШИМ представлена выражением:

$$f_{ШИМ}(t) = \sin^{-1}(\sin(2\pi \cdot f_n)), \quad (9)$$

где  $f_n$  — величина несущей частоты.

Поскольку амплитуда полученного значения больше единицы, нормализуем амплитуду следующим образом:

$$r = \max(f_{ШИМ}), \quad (10)$$

$$f_{ШИМ}(t) = \frac{f_{ШИМ}(t)}{r}.$$

Окончательно ШИМ-сигнал для затворов силовых транзисторов первичной цепи найдем как:

$$G_1(t) = \begin{cases} M_1 = 1 & \text{если } f_{ШИМ}(t) \geq \gamma_n \\ M_1 = 0 & \text{если } f_{ШИМ}(t) \leq \gamma_n \end{cases}, \quad (11)$$

$$G_2(t) = \begin{cases} M_2 = 1 & \text{если } f_{ШИМ}(t) \leq -\gamma_n \\ M_2 = 0 & \text{если } f_{ШИМ}(t) \geq -\gamma_n \end{cases}.$$

**Экспериментальная часть.** Для подтверждения правильности исследований на имитационной модели был разработан опытный образец источника питания для ЭДМД, представленный на рис. 2.

Источник питания функционирует в диапазоне от 40 до 120 Вт выходной мощности и 12–18 В входного напряжения. Для возбуждения основного дугового разряда в ЭДМД источник питания формировал импульсы высокого напряжения <5 кВ. Формирование импульсов высокого напряжения прекращалось при стабильной работе основного дугового разряда и возобновлялось при нестабильной работе.

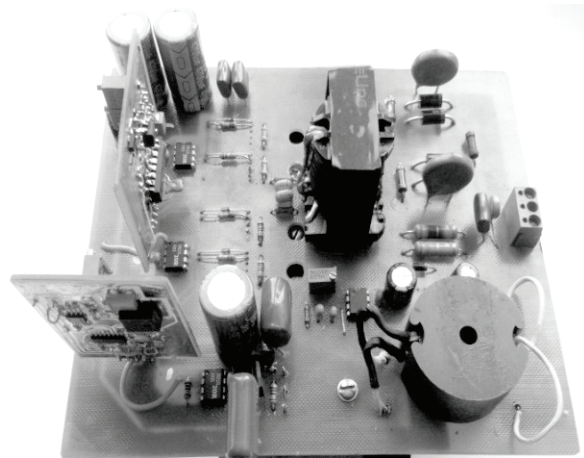


Рис. 2. Источник питания ЭДМД

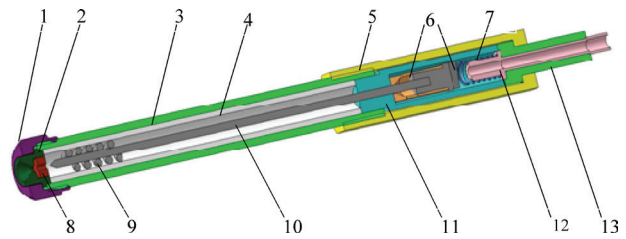


Рис. 3. Электродуговой микродвигатель:

- 1, 5 — гайка накидная; 2 — сопло; 3 — корпус;
- 4 — трубка (корундовая керамика); 6 — цапга;
- 7 — пружина; 8 — анод (торированный вольфрам);
- 9 — завихритель; 10 — катод (лантанированный вольфрам);
- 11, 13 — вставка электроизоляционная (фторопласт);
- 12 — трубопровод подачи рабочего тела

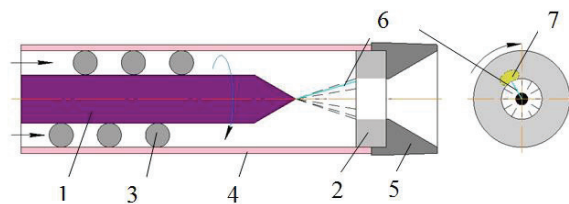


Рис. 4. Разрез ЭДМД:

- 1 — катод; 2 — анод; 3 — завихритель; 4 — корпус;
- 5 — сопло; 6 — мгновенная дуга; 7 — анодное пятно

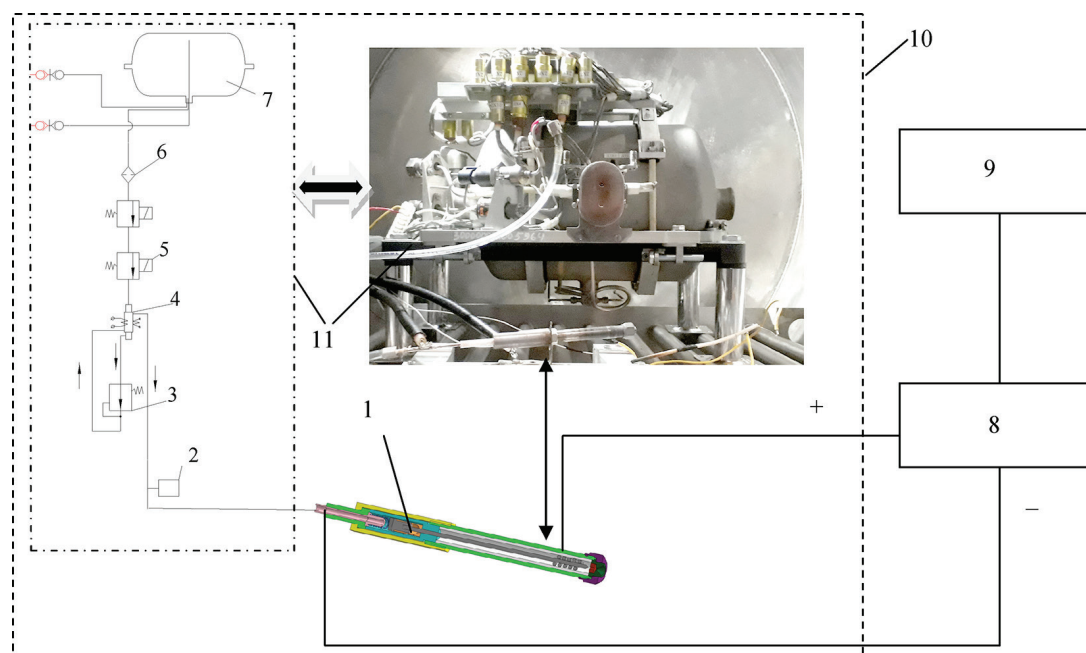


Рис. 5. Пневмогидравлическая схема проведения испытаний:  
 1 — ЭДМД; 2 — манометр; 3 — регулятор давления; 4 — испаритель; 5 — электроклапан;  
 6 — фильтр; 7 — топливный бак; 8 — источник питания ЭДМД; 9 — лабораторный источник питания;  
 10 — вакуумная камера; 11 — корректирующая двигательная установка

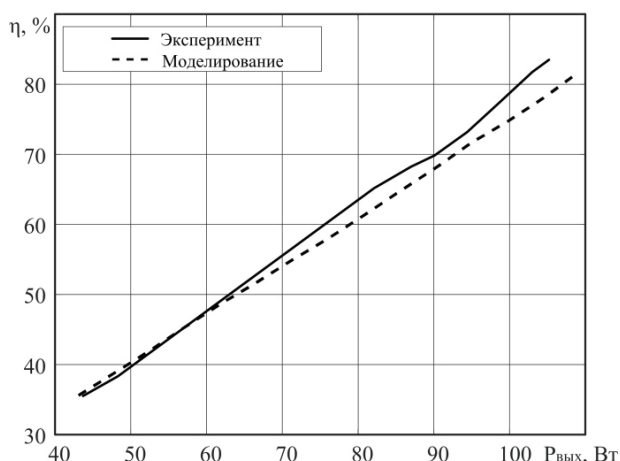


Рис. 6. Зависимость эффективности источника питания от выходной мощности

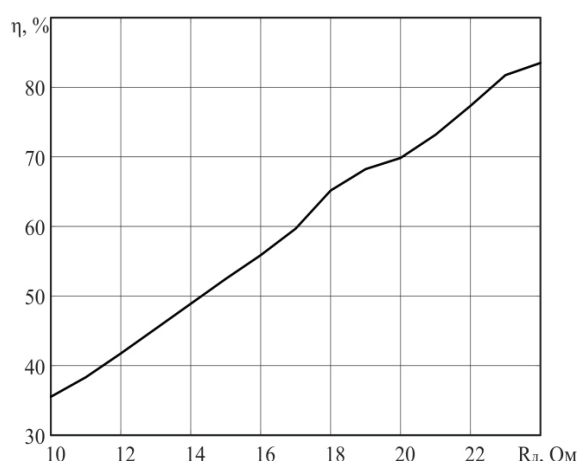


Рис. 7. Зависимость эффективности источника от сопротивления ЭДМД как нагрузки

ЭДМД имел коническое сопло с диаметром критического сечения  $d_{кр} = 0,8$  мм и диаметром среза сопла  $d_c = 2,0$  мм (рис. 3).

Дуга образуется между катодом 1 и анодом 2. Под действием закрутки потока газа анодное пятно дуги перемещается по кромке отверстия в аноде по направлению, совпадающему с закруткой газа (рис. 4). В каждый определенный момент времени нагреву подвергается только часть анода, в месте расположения анодного пятна. Оставшаяся часть анода охлаждается истекающим газом.

На рис. 5 представлена пневмогидравлическая схема проведения испытаний источника питания. Экспериментальные исследования проводились в вакуумной камере с полезным объемом  $0,47$  м<sup>3</sup>. Вакуумная система откачки создавала давление  $6$  Па перед включением и  $60$  Па при работе ЭДМД [8].

**Результаты проведенных исследований.** На рис. 6, 7 представлены энергетические харак-

теристики источника питания ЭДМД. Характеристики получены при разном сопротивлении ЭДМД в режиме стабилизации тока величиной  $I_{гуги} = 1,5 - 2$  А. Величина сопротивления устанавливалась с помощью изменения скорости потока газа и расстояния между соплом и катодом.

На рис. 8 представлена вольтамперная характеристика источника питания ЭДМД [9, 10]. Из рисунка видно, что напряжение дуги на ЭДМД уменьшается с увеличением тока и увеличивается со скоростью потока рабочего тела. В области установившегося режима работы ЭДМД наблюдаются хаотические флуктуации рабочей точки. Причиной этого служат импульсные помехи, созданные ШИМ, и нелинейность системы управления. Максимальный установленный ток в режиме короткого замыкания составил  $7$  А.

В результате экспериментальных исследований ЭДМД на аргоне при потребляемой мощности

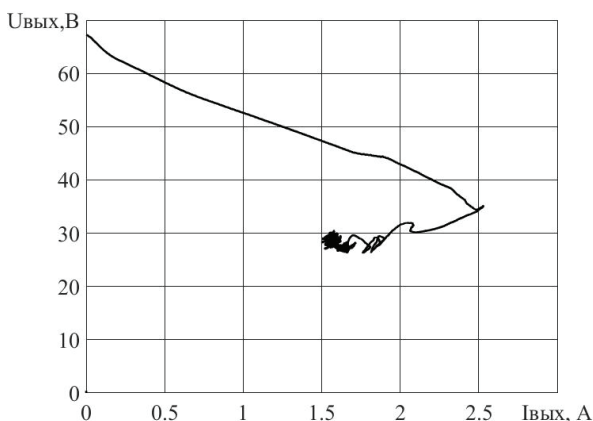


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика ЭДМД

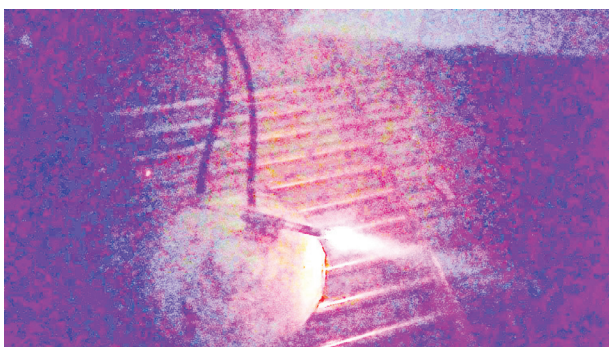


Рис. 9. Демонстрация работы ЭДМД

$P_{\text{вых}} = 97$  Вт подтверждена работоспособность путем визуализации устойчивой электрической дуги. Мгновенный столб дуги горит между острием катода и анодным пятном. За счет струи закрученного газа мгновенный столб дуги совершает кольцевое перемещение по внутренней кромке соплового отверстия анода. Происходит интенсивный местный нагрев анода в области текущего мгновенного положения анодного пятна. Поток газа частично нагревается в столбе дуги, а часть газа проходит вне столба дуги, охлаждает анод вне анодного пятна, а сам газ нагревается. Фотография демонстрации работы приведена на рис. 9.

**Вывод.** Прообраз источника питания ЭДМД подтверждает актуальность применения замкнутой системы управления током с быстрым откликом, которая используется для стабильной работы при малой мощности. В режиме стабилизации тока при изменяемой нагрузке источник функционирует в диапазоне мощностей от 40–120 Вт при входном напряжении 12–18 В.

Наибольшая энергоэффективность использованной топологии получена при сопротивлении нагрузки  $R_g = 25$  Ом. Интегрированный высоковольтный преобразователь системы запуска позволил формировать импульсы высокого напряжения длительностью  $t_u = 10$  мкс с амплитудой до 5 кВ, что обеспечивает надежный запуск ЭДМД.

Приведенный в работе прообраз источника питания ЭДМД не является законченным изделием и рассматривается как инструмент, предназначенный для экспериментальных исследований направленных на разработку надежной системы питания ЭДМД.

## Библиографический список

1. Wollenhaupt B. L., Hammer A., Herdrich G. [et al.]. A Very Low Power Arcjet (VELARC) for Small Satellite Missions // 32nd Intern. Electric Propulsion Conf. (IEPC 2011), Sept. 11–15, 2011. Wiesbaden, 2011. 11 p.
2. Dropmann M., Ehresmann M., Pagan A. S. [et al.]. Low Power Arcjet Application for End of Life Satellite Servicing // Proc. 7th European Conf. on Space Debris, Apr. 18–21, 2017. Darmstadt, Germany. 2017. P. 18–21.
3. Sankovic J., Jacobson D. Performance of a Miniaturized Arcjet // 31st Joint Propulsion Conf. and Exhibit, July 10–12, 1995. California, 1995. P. 2822.
4. Tang H., Zhang X., Liu Y. [et al.]. Performance and preliminary life test of a low power hydrazine engineering design model arcjet // Aerospace Science and Technology. 2011. Vol. 15, Issue 7. P. 577–588. DOI: 10.1016/j.ast.2010.12.001.
5. Боязитов С. Ю., Вастрюков В. Ф., Деев В. Е. [и др.]. Система электропитания корректирующей двигательной установки малого космического аппарата // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 4. С. 97–101.
6. Федоров В. К., Федянин В. В., Федоров Д. В. Алгоритм формирования широтно-импульсной модуляции с несущей частотой в режиме детерминированного хаоса // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 45–49.
7. Davari P. High frequency high power converters for industrial applications. Brisbane: QUT Thesis, 2013. 260 p.
8. Blinov V. N., Vavilov I. S., Fedynin V. V. [et al.]. Experimental investigations of nitrogen arcjet thruster with control unit for small spacecrafts // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1210. P. 012019-1–012019-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012019.
9. Лисиенко В. Г., Лавров Н. Г., Близник М. Г. Моделирование сварочной и печной электрической дуги // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сб. тр. конф. Екатеринбург, 2015. С. 378–386.
10. Pan W. X., Meng X., Huang H. J. [et al.]. Effects of anode temperature on the arc volt–ampere characteristics and ejected plume property of a low-power supersonic plasma // Plasma Sources Science and Technology. 2011. Vol. 20 (6). P. 065006. DOI: 10.1088/0963-0252/20/6/065006.

**ФЕДЯНИН Виктор Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

**ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич**, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: k13201@rambler.ru

## Для цитирования

Федянин В. В., Ячменев П. С. Разработка и экспериментальные исследования источника питания электродуговых микродвигателей для корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 46–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-46-50.

Статья поступила в редакцию 02.07.2019 г.

© В. В. Федянин, П. С. Ячменев