

**ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ**А. А. Мошняков^{1,2}, М. В. Михайлов^{1,2*}¹АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

*E-mail: maxmir2004@mail.ru

Использование электрореактивных плазменных двигателей для коррекции орбиты космических аппаратов обусловлено стремлением уменьшить массу двигательной установки за счет снижения расхода рабочего тела. В настоящее время электропитание нагревательных элементов двигательной установки осуществляется постоянным током из-за простоты его измерения и стабилизации. Поскольку требуется гальванически развязанное питание, то на выходе трансформатора устанавливается мощный низковольтный выпрямитель, значительно увеличивающий потери. Кроме того, низкое быстродействие диодов вызывает увеличение уровня помех трансформатора. Электропитание переменным стабилизированным током позволяет улучшить массогабаритные и энергетические показатели системы преобразования и управления, а также снизить уровень помех.

Основная проблема при работе со стабилизированным переменным током – изменение его формы в зависимости от сопротивления нагрузки, напряжения питания и длины кабелей, что затрудняет процесс измерения действующего значения и стабилизации тока. Есть несколько способов решения этой проблемы: использование датчика действующего значения тока, входного регулятора постоянного тока и нерегулируемого выходного инвертора, установка выходного L-фильтра. Наиболее перспективен первый из них. Однако в настоящее время из-за сложности реализации датчика эффективнее применение входного регулятора постоянного тока с нерегулируемым выходным инвертором и уменьшенным L-фильтром. Такая схема обеспечивает неизменную форму выходного тока независимо от входного напряжения и сопротивления нагрузки, а L-фильтр исключает влияние кабелей.

Исходя из этого, разработана модель устройства электропитания нагревателя катода на переменном токе. Приведены диаграммы её работы при крайних значениях напряжения питания, сопротивления нагрузки и индуктивности кабелей. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности реализации устройства с требуемыми выходными характеристиками.

Электропитание нагревательных элементов двигательной установки на базе электрореактивного плазменного двигателя переменным током – это перспективное направление улучшения массогабаритных и энергетических показателей как системы электропитания, так и двигательной установки в целом.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, система преобразования и управления, нагревательный элемент.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 193–197**ELECTRIC POWER SUPPLY OF HEATER ELEMENTS
OF ELECTRIC PROPULSION THRUSTER BY REGULATED ALTERNATING CURRENT**A. A. Moshnyakov^{1,2}, M. V. Mikhaylov^{1,2*}¹SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation²National research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

*E-mail: maxmir2004@mail.ru

Using of electric propulsion thrusters for space-craft's orbit correction allow decreasing mass of electric propulsion system due to reduced propellant mass. At the moment using direct current in electric power supply of electric propulsion thruster's heater elements is due to simple measuring and stabilization. On the transformer output has the

low-voltage power rectifier because galvanic isolation power supply is required. Using the low-voltage power rectifier is significantly increasing power loss. In addition, diode's slow response increases the noise level of transformer. Electric power supply by regulated alternating current improving dimensions, mass and electric power characteristics of power processing unit is used.

Cardinal problem in work with regulated alternating current is changing current waveform which depends on load resistance, supply voltage and length of cables. These changes will make measuring root-mean-square value of current difficult as well as current stabilization. We have several ways of solution of these problems: sensing unit of root-mean-square value of current, output L-filter, input regulator of DC current and unregulated output inverter. Most long-term way of solution is using sensing unit of root-mean-square value of current. But at the moment effective using is input regulator of DC current with unregulated output inverter and L-filter. That design of power supply ensuring fixed waveform of output current independent of input voltage and load resistance. L-filter circuit removes influence of cables.

In this paper SPICE-model of electric power supply (operating on alternating current) of cathode heater is presented. Also time diagrams of operating SPICE-model limit values of voltage supply, load resistance and inductance of cables are presented. Submitted data allow achieving practical realization of this power supply.

Using of electric power supply of heater elements of electric propulsion thruster by regulated alternating current is long-term aim, which improving mass and electric power characteristics of electric propulsion system.

Keywords: Hall-effect thruster, power processing unit, heater element.

Введение. Широкое распространение электрореактивных плазменных двигателей, используемых для коррекции орбиты космического аппарата, обусловлено стремлением уменьшить массу двигательной установки за счет снижения расхода рабочего тела по сравнению с химическими реактивными двигателями [1; 2]. Неотъемлемой частью любой двигательной установки на основе электрореактивного плазменного двигателя является система преобразования и управления (СПУ), представляющая собой набор преобразователей электрической энергии [3–5]. В состав СПУ входит минимум пять источников питания: разряда промежутка анод–катод, нагревателя катода, электрода поджига, термодросселя и клапанов. Нагреватель катода и термодроссель представляют собой металлические элементы, нагреваемые током. В настоящее время их нагрев осуществляется постоянным током из-за простоты его измерения и стабилизации. Поскольку требуется гальванически развязанное питание, то на выходе трансформатора устанавливается мощный низковольтный выпрямитель, значительно увеличивающий потери. Кроме того, низкое быстродействие диодов вызывает увеличение уровня помех трансформатора и снижает надежность СПУ в целом. Устранить указанные недостатки можно с помощью электропитания нагревательных элементов двигательной установки переменным током. Такой способ применялся в первых СПУ [6; 7], однако тогда не требовалась стабилизация тока, что значительно упрощало задачу [8].

Основная проблема при работе со стабилизированным переменным током – изменение его скважности и гармонического спектра, вызывающего изменение формы в зависимости от сопротивления нагрузки, напряжения питания и длины кабелей. Отсюда, как следствие, сложность поддержания его действующего значения в заданных пределах [9; 10].

Способы решения. Есть несколько способов решения этой проблемы:

- использование датчика действующего значения тока;
- установка выходного L -фильтра [11];

– применение входного регулятора постоянного тока и нерегулируемого выходного инвертора.

Датчик действующего значения тока представляет собой сложное электронное устройство [12], преобразующее переменный входной сигнал в постоянное выходное напряжение, эквивалентное действующему значению тока, которое подается на вход системы управления. Его недостатки – сложная схемотехническая реализация и невысокая точность, в большинстве случаев он предназначен для работы с синусоидальным током, однако способ, основанный на использовании этого устройства, перспективен вследствие быстрого развития электронной и измерительной техники.

Выходной L -фильтр – это дроссель, индуктивность которого много больше индуктивности кабелей, что позволяет уменьшить изменение гармонического спектра тока, вызванное коммутацией силовых транзисторов инвертора, и компенсировать индуктивность кабелей. Однако амплитуда и скважность импульсов будут изменяться в зависимости от сопротивления нагрузки и напряжения питания, что затруднит определение действующего значения.

Входной регулятор постоянного тока в сочетании с нерегулируемым инвертором обеспечивает неизменную прямоугольную форму тока независимо от входного напряжения и сопротивления нагрузки. Подключив к выходу инвертора L -фильтр, можно исключить влияние кабелей, при этом форма тока станет экспоненциальной. Таким образом, при воздействии всех дестабилизирующих факторов форма и амплитуда тока меняются незначительно.

Модель устройства электропитания нагревателя катода. Для исследования электрических процессов, протекающих в схеме формирователя переменного тока нагревателя катода, разработана модель в среде Micro-Cap 9 [13; 14] (рис. 1). Она включает в себя входной источник питания V1 напряжением 80–120 В с внутренним сопротивлением R1, преобразователь постоянного напряжения понижающего типа (VT1, L4, VD1, C1, V6), мостовой инвертор, трансформатор (K1, L1, L2), выходной фильтр L5 и нагрузку (L3, R11).

На первом этапе исследования транзистор VT1 был постоянно открыт при помощи источника V6, а регулирование тока осуществлялось инвертором (VT2–VT5) путем изменения скважности импульсов напряжения источников (V2–V5). Выходной фильтр L5 отсутствовал. В результате моделирования (рис. 2) видно, что при неизменном действующем значении тока его форма и амплитуда существенно отличаются, а следовательно, погрешность измерения будет высокой.

На рис. 3 показаны результаты моделирования, когда стабилизация тока осуществлялась ключом VT1 при помощи изменения скважности импульсов напряжения источника V6. Скважность импульсов напряжения источников V2–V5 в этом случае равнялась 2 и не зависела от входного напряжения источника V1, сопротивления и индуктивности нагрузки (R11, L3).

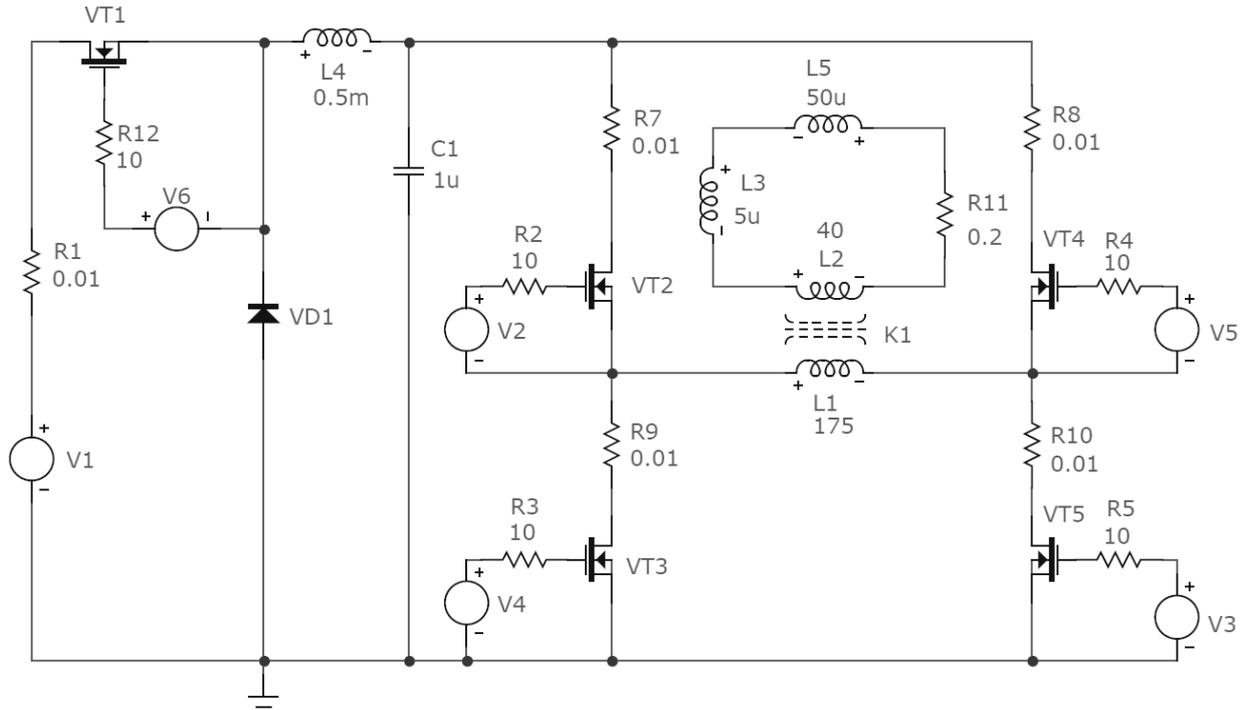
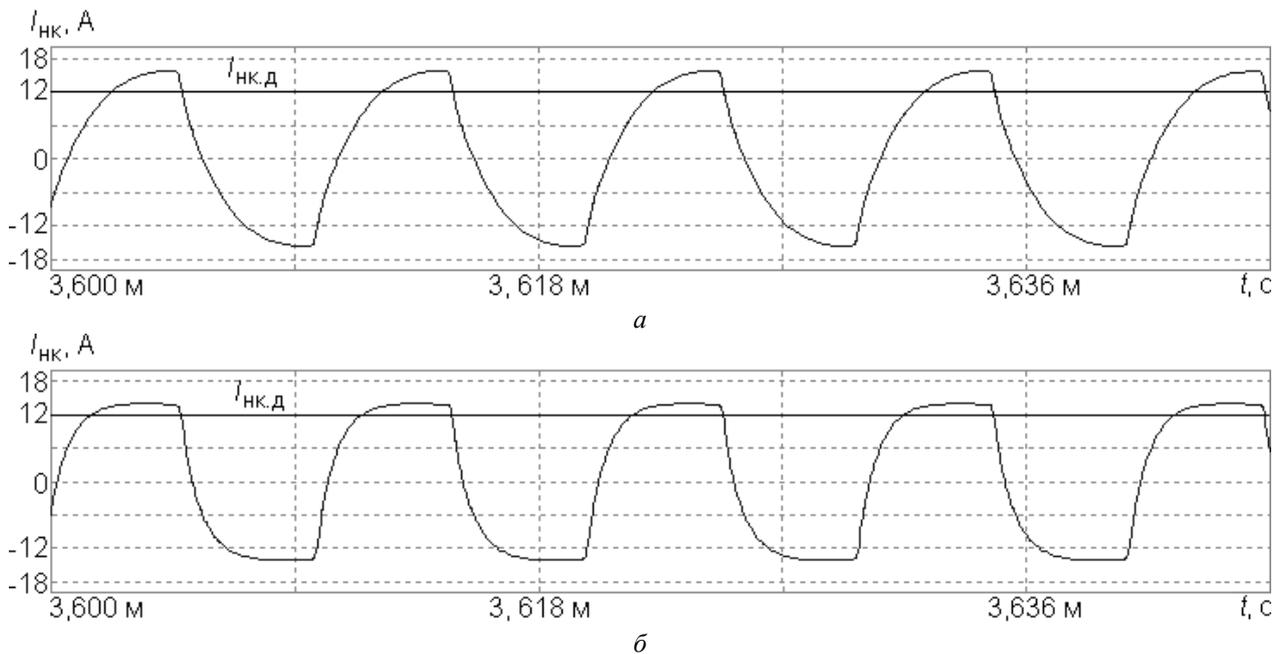


Рис. 1. Модель схемы формирователя переменного тока для нагревателя катода



Рис. 2. Ток накала катода $I_{нк}$:

$a - R_{11} = 0,2 \text{ Ом}, L_3 = 5 \text{ мкГн}, U_{V1} = 120 \text{ В}$; $b - R_{11} = 0,7 \text{ Ом}, L_3 = 50 \text{ мкГн}, U_{V1} = 80 \text{ В}$

Рис. 3. Ток накала катода $I_{нк}$ с учетом L -фильтра:

$a - R_{11} = 0,2 \text{ Ом}, L_3 = 5 \text{ мкГн}, U_{V1} = 120 \text{ В}; б - R_{11} = 0,7 \text{ Ом}, L_3 = 50 \text{ мкГн}, U_{V1} = 80 \text{ В}$

При этом форма тока и амплитуда изменяются значительно меньше, чем в первом случае, следовательно, измерение и стабилизация такого тока могут выполняться со значительно большей точностью.

Поскольку регулятор расположен на входной (высоковольтной) стороне, то энергетические и массогабаритные характеристики полученного устройства заметно лучше, чем у используемых источников питания с выходным низковольтным выпрямителем [15], а погрешность измерения переменного тока неизменной формы можно дополнительно снизить путем компенсации статической ошибки.

Заключение. Электропитание нагревательных элементов электрореактивного плазменного двигателя переменным стабилизированным током – это перспективное направление развития СПУ, позволяющее улучшить массогабаритные и энергетические показатели как источников питания, так и двигательной установки в целом. Для увеличения точности стабилизации целесообразно удерживать форму тока неизменной при любых сочетаниях напряжения питания, сопротивления нагрузки и индуктивности кабелей.

Библиографические ссылки

1. Lazurenko A., Mazouffre S., Prioul M. Recent Advances in Dual-mode Hall Effect Thruster Development // Recent Advances in Space Technologies. 2005. P. 339–343.
2. Burkhardt H., Sippel M., Krulle G. Evaluation of Propulsion Systems for Satellite End-of-Life De-orbiting // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2002.
3. Михайлов М. В. Устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2006.

4. Choo Won-Gyo, Jeong Yun-hwang. The Development of 260W Power Processing Units for Hall Effect Propulsion System // The 32nd Intern. Electric Propulsion Conf. 2011.

5. Bourguignon E., Fraselle S., Scalais T. Power Processing Unit Activities at Thales Alenia Space ETCA // The 32nd Intern. Electric Propulsion Conf. 2011.

6. А. с. 752664 СССР. Преобразователь напряжения / М. М. Глибицкий [и др.] (СССР). № 2547576/24–07 ; заявл. 21.11.77 ; опубл. 30.07.80, Бюл. № 28. 3 с. : ил.

7. Глибицкий М. М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. М. : Машиностроение, 1981. 136 с.

8. Пат. 2298194 Российская Федерация. Способ измерения действующего значения напряжения в электрических цепях переменного тока / Кудашов А. В., Митохин В. Д., Чернецов В. И. № 2006108101/28 ; заявл. 15.03.06 ; опубл. 27.04.07.

9. Метод измерения действующего значения с помощью МК [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/193022> (дата обращения: 27.10.14).

10. Действующие значения напряжения и тока. Возможно ли их измерить методами аналоговой техники? [Электронный ресурс]. URL: http://www.tca.ru/list_of_articles/detail.php?ID=363 (дата обращения: 27.10.14).

11. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005. 632 с.

12. Макита Йо, Ролье Стефан. Датчики тока с дополнительными интеллектуальными функциями // Силовая электроника. 2014. № 1. С. 40–43.

13. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М. : Горячая линия–Телеком, 2007. 464 с.

14. Михайлов М. В., Казанцев Ю. М. Интегрированная модель каналов электропитания СПД // Известия ТПУ. 2006. № 4, т. 309. С. 149–153.

15. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992. 296 с.

References

1. Lazurenko A., Mazouffre S., Prioul M. [Recent Advances in Dual-mode Hall Effect Thruster Development]. *Recent Advances in Space Technologies*. 2005, p. 339–343.

2. Burkhardt H., Sippel M., Krulle G. [Evaluation of Propulsion Systems for Satellite End-of-Life De-orbiting]. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 2002.

3. Mikhaylov M. V. *Ustroystvo zapuska i elektropitaniya stantsionarnogo plazmennogo dvigatelya*. Dis. kand. tekhn. nauk. [The device start-up and power stationary plasma thruster. Dis. Cand. Tehn. Sciences]. Tomsk, 2006.

4. Choo Won-Gyo, Jeong Yun-hwang [The Development of 260W Power Processing Units for Hall Effect Propulsion System]. *The 32nd International Electric Propulsion Conference*. 2011.

5. Bourguignon E., Fraselle S., Scalais T. Power Processing Unit Activities at Thales Alenia Space ETCA. *The 32nd International Electric Propulsion Conference*. 2011.

6. Glibitskiy M. M., Yriev A. N. et al. *Preobrazovatel' napryazheniya* [Supply converter]. Patent USSR, no. 752664, 1980.

7. Glibitskiy M. M. *Sistemy pitaniya i upravleniya elektricheskimi raketnymi dvigatelyami*. [Power systems management and electric propulsion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, p. 136.

8. Kudashov A. V., Mitokhin V. D., Chernetsov V. I. *Sposob izmereniya deystvuyushchego znacheniya napryazheniya v elektricheskikh tsepyakh peremennogo toka* [A method for measuring the rms value of the voltage in electrical circuits, AC]. Patent RF, no. 2298194, 2007.

9. *Metod izmereniya deystvuyushchego znacheniya s pomoshch'yu MK* [Method of measuring the current values by MK]. Available at: <http://habrahabr.ru/post/193022> (accessed 27.10.14).

10. *Deystvuyushchie znacheniya napryazheniya i toka. Vozmozhno li ikh izmerit' metodami analogovoy tekhniki?* [RMS values of voltage and current. Can they be measured by analog technology?]. Available at: http://www.tca.ru/list_of_articles/detail.php?ID=363 (accessed 27.10.14).

11. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converters.]. 2005, p. 632.

12. Makita Yo, Rolye Stefan. [Current sensors with additional smart features]. *Silovaya elektronika*. 2014, no. 1 (In Russ.). Available at: http://www.power-e.ru/pre_40_01_14_IsencFncts.php. (accessed 27.10.14).

13. Amelina M. A., Amelin C. A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8*. [Circuit simulation program Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007, 464 p.

14. Mikhaylov M. V., Kazantsev Y. M. [Integririvannaya model kanalov elektropitaniya SPD]. *Izvesiya TPU*. 2006, vol. 309, no. 4, p. 149–153 (In Russ.).

15. Rozanov Y. K. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, p. 296.