

УДК 62-932.2

Алексєєнко О.А.* , Перепечкін А.С .*, Петренко О.М.** , Сербін В.В.*

* *Space Electric Thrusters Systems (SETS), м. Дніпро, Україна*

** *Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

РЕГУЛЯТОРИ ВИТРАТ РОБОЧОЇ РЕЧОВИНИ ЛАБОРАТОРНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ХОЛОВСЬКИХ ДВИГУНІВ

Представлені результати розробки і тарировки блоків регулювання величини витрат газових робочих речовин (аргону, ксенону та ін.) для проведення лабораторних випробувань холловських двигунів. Розроблені блоки дозволяють забезпечити незалежну подачу газових робочих речовин в анодний блок та полий катод. В основі блоків регулювання витрат використовуються промислові блоки фірми Bronkhorst, які забезпечують регулювання величини витрат від 0,06 до 2,7 мг/сек по аргону. Індикатори блоків регулювання витрат забезпечують індикацію: робочу речовину, яка використовується, поточну величину витрат в мг/сек, еквівалентну витратам величину струму в А, сумарну величину витрат протягом заданого часу. Точність підтримання витрат складає 1,5 %. Розроблені блоки дозволяють проводити лабораторні випробування і відпрацювання анодних блоків холловських двигунів різних типорозмірів, а також полі катоди різних конструкцій.

Ключові слова: *регулятор витрат робочої речовини, лабораторні випробування, холловський двигун, анодний блок, полий катод, газова робоча речовина.*

Представлены результаты разработки и тарирования блоков регулирования величины расхода газообразных рабочих веществ (аргона, ксенона и др.) для проведения лабораторных испытаний холловских двигателей. Разработанные блоки позволяют обеспечить независимую подачу газообразных рабочих веществ в анодный блок и полый катод. В основу блоков регулирования расхода положены промышленные блоки фирмы Bronkhorst, обеспечивающие регулирование величины расхода от 0,06 до 2,7 мг/сек по аргону. Индикаторы блоков регулирования расхода обеспечивают индикацию: применяемое рабочее вещество, текущую величину расхода в мг/сек, эквивалентную расходу величину тока в А, суммарную величину расхода в течение заданного времени. Точность поддержания расхода составляет 1,5%. Разработанные блоки позволяют проводить лабораторные испытания и отработку анодных блоков холловских двигателей различных типоразмеров, а также полые катоды различных конструкций.

Ключевые слова: *регулятор расхода рабочего вещества, лабораторные испытания, холловский двигатель, анодный блок, полый катод, газообразное рабочее вещество.*

The results of development and calibration of gaseous Propellant Flow Regulators (argon, xenon, etc.) which can be used for the laboratory testing the performance of Hall Effect Thruster are presented. The developed units enable to provide the independent supply of gaseous propellants into an Anode Unit and a Hollow Cathode. Industrial units of Bronkhorst High-Tech B.V., which provide mass flow rate regulation and measurement in range 0.06 - 2.7 mg/s for argon, were used as the basis for Propellant Flow Regulators. The indicators of mass flow rate regulators indicate the following: propellant what is used, instantaneous mass flow rate (in mg/s), the current level equivalent to the instantaneous mass flow rate (in A) and the

summary mass flow rate at the reference of time. The mass flow rate accuracy keeping is not less to 1.5 %. The developed units enable to carry out laboratory tests and adjustments of Hall Effect Thruster Anode Units of different dimensions models, as well as Hollow Cathodes of various designs.

Keywords: *Mass flow rate controller, laboratory tests, Hall Effect Thruster, Anode Unit, Hollow Cathode, gaseous working substance.*

Актуальність проблеми. Під час проведення лабораторних випробувань та відпрацювання вузлів та підсистем електричних ракетних двигунних установок (ЕРДУ) необхідна лабораторна система збереження та подачі робочої речовини, яка має забезпечити подачу заданого рівня витрат робочої речовини в анодний блок холовського двигуна і полий катод. Протягом випробувань та відпрацювання анодного блоку та полого катода величину витрат робочої речовини потрібно змінювати в широкому діапазоні.

Класичні схеми газових систем збереження і подачі робочої речовини для електричних ракетних двигунів (ЕРД) містять такі елементи: бак для зберігання робочої речовини високого тиску, редуктор, систему клапанів та жиклерів, які забезпечують потрібну величину витрат робочої речовини в анодний блок і полий катод. Недоліком традиційних систем збереження та подачі робочої речовини для випробувань та відпрацювання вузлів та підсистем ЕРДУ є відсутність можливості незалежної подачі та зміни в широкому діапазоні і підтримання на заданому рівні величини витрат в анодний блок і полий катод.

Зазначений недолік може бути виправлений шляхом створення лабораторних регуляторів витрат газу, як робочої речовини з функцією регулювання та стабілізації рівня витрат.

Постановка задачі. Необхідно розробити пристрій для незалежної подачі газової робочої речовини в анодний блок і полий катод холовського двигуна з можливістю регулювання витрат і забезпечення стабілізації величини витрат. Протягом лабораторних досліджень холовських двигунів використовуються різні гази (ксенон, аргон, криптон та ін.), тому лабораторний регулятор витрат повинен забезпечити переналаштування його для роботи з конкретним газом.

Пристрій повинен забезпечити можливість дистанційного управління та зйому інформації щодо робочого стану пристрою.

Вимоги до технічних характеристик пристрою наступні:

- діапазон регулювання витрат робочої речовини – 0,1 ... 5,0 мг/сек (для ксенону);
- кількість каналів подачі газу – один;
- можливість включення/відключення подачі газу;
- наявність шини даних, яка дозволяє здійснювати дистанційне управління та реєстрацію;
- робочі гази – ксенон, аргон, криптон;
- забезпечення стабілізації витрат робочого газу та можливість регулювання витрат протягом лабораторних досліджень в заданому діапазоні;

- наявність індикації газу, який використовується, поточного рівня витрат в мг/сек, еквівалентного витратам рівня струму в А, сумарної величини витрат газу протягом заданого часу.

Вирішення поставленої задачі. Традиційна схема лабораторної системи подачі робочого газу в експериментальну двигунну установку має два канали витрат, як показано на рис. 1. Така схема забезпечує можливість незалежної подачі і регулювання витрат газу в анодний блок і полий катод. Це дозволяє підібрати оптимальні режими роботи анодного блоку і полого катоду холловського двигуна.

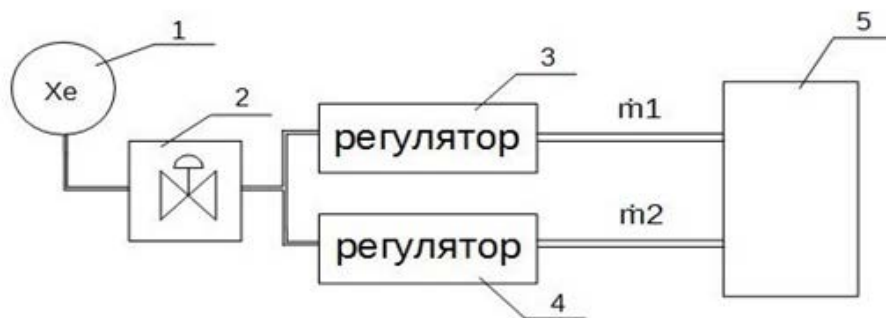


Рис. 1. Схема регулювання витрат робочої речовини

1 – балон з робочим газом високого тиску (5 – 6 МПа); 2 – газований редуктор, який знижує тиск газу до робочого значення тиску на вході регулятора; 3, 4 – регулятори витрат газу, які забезпечують подачу робочого газу в анодний блок (\dot{m}_1) і полий катод (\dot{m}_2); 5 – електричний ракетний двигун.

Після оптимізації анодного блоку і полого катоду холловського двигуна проводиться розробка та відпрацювання вузлів та елементів бортової системи подачі робочого газу, для чого здійснюється перехід до структурної схеми системи подачі з одним регулятором витрат робочої речовини, як показано на рис. 2.

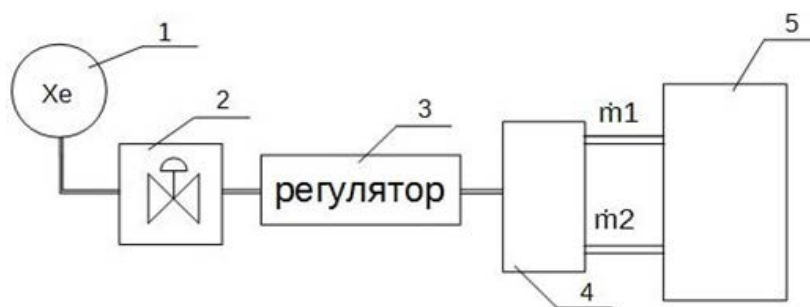


Рис. 2. Схема одноканального регулювання витрат робочої речовини:

1 – балон з робочим газом високого тиску (5 – 6 МПа); 2 – газований редуктор, який знижує тиск газу до робочого значення тиску на вході регулятора; 3 – регулятор витрат робочої речовини; 4 – пристрій пропорційного розподілу газу між анодним блоком і полим катодом; 5 – електричний ракетний двигун.

Під час розробки лабораторного регулятора витрат робочої речовини, для зменшення строків і витрат на розробку, доцільно використовувати вузли і

блоки регуляторів, які випускаються промисловістю серійно. Серед виробників таких пристроїв слід виділити фірми Sierra, Alicat, Artisan, Bronkhorst та ін.

В якості основи для побудування регуляторів витрат для лабораторної системи подачі вибрано пристрій фірми Bronkhorst, модель F-201CV-100-AAD-22-V (рис. 3), параметри якого найбільш повно відповідають поставленій задачі. Вибраний пристрій має наступні параметри:

- основний газ — Ar;
- мінімальний рівень витрат — $0,019 \text{ см}^3/\text{сек}$;
- максимальний рівень витрат — $1,39 \text{ см}^3/\text{сек}$;
- точність вимірювань — 1 % для діапазону витрат 20...100 %;
- вхідний тиск — $1.2 \pm 10\% \text{ Bar}$;
- можливість перерахунку величини витрат для других газів (Xe, Kr).

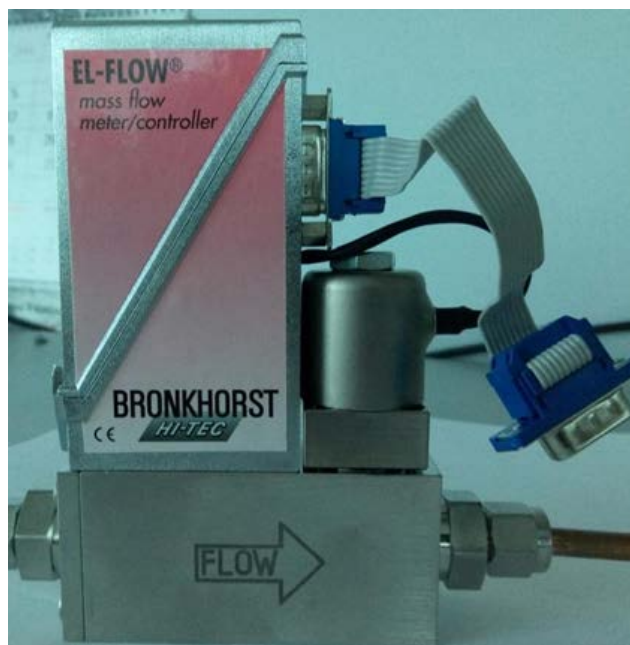


Рис. 3. Блок регулятора витрат газу фірми Bronkhorst

Для роботи блоку потрібне зовнішнє живлення напругою 15 В. Управління здійснюється почею напруги 0 ... 5 В, де 0 В – повністю виключена подача робочої речовини, а напруга 5 В відповідає рівню максимальних витрат. Виміряне значення витрат газу пристрій видає у вигляді аналогової напруги у діапазоні 0 ... 5 В.

Структурну схему розробленого регулятора витрат робочої речовини можна представити у виді, як показано на рис. 4.

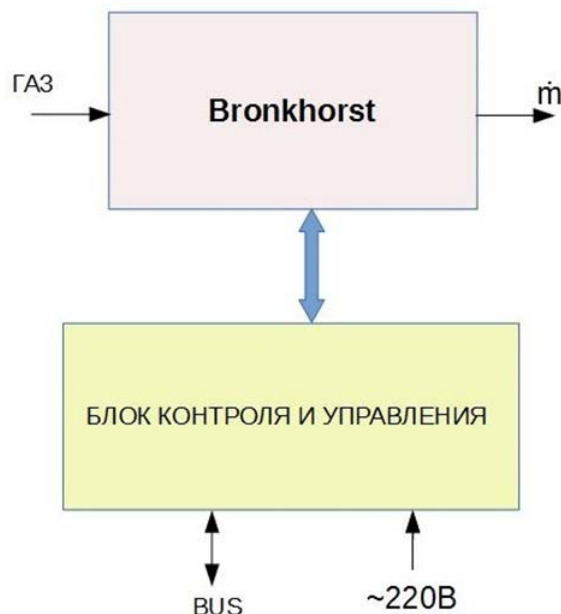


Рис. 4. Блок-схема регулятора витрат газу

На рис. 4 наведено:

Bronkhorst – вимірювальний та виконавчий пристрій регулятора витрат робочого газу;

блок контролю та управління – містить в собі блок живлення, обчислювач та інші системи для роботи з Bronkhorst.

На функціональній схемі (рис. 5) регулятор наведено більш детально.

Bronkhorst (блок A1) підключається до схеми за допомогою роз'єма, через який отримує електричне живлення і управління, а повертає сигнал, який є пропорційним виміряним витратам робочої речовини. Блоки A5, A8, A9, A13 формують напруги живлення та службові (V_{ref}) напруги, які необхідні для роботи регулятора витрат робочої речовини.

В якості мікроконтролера використовується мікросхема фірми Atmel серії AVR. Мікроконтролер має 8-розрядну архітектуру та, оскільки у нього відсутній блок обчислень з плаваючою комою, використовується цілочислена арифметика. Ця обставина дозволяє виконувати достатньо швидкі обчислення величини витрат робочої речовини, яка подається або у анодний блок, або у полий катод холовського двигуна.

Використання цілочислої арифметики вимагає використання 12-розрядних АЦП (блок A2) і ЦАП (A4). Висока розрядність дозволила суттєво знизити втрати точності під час вимірів до рівня нижче точності вимірювача Bronkhorst.

Для завдання параметрів та управління роботою вимірювача витрат робочої речовини використані механічні кнопки та декодер (блок A6).

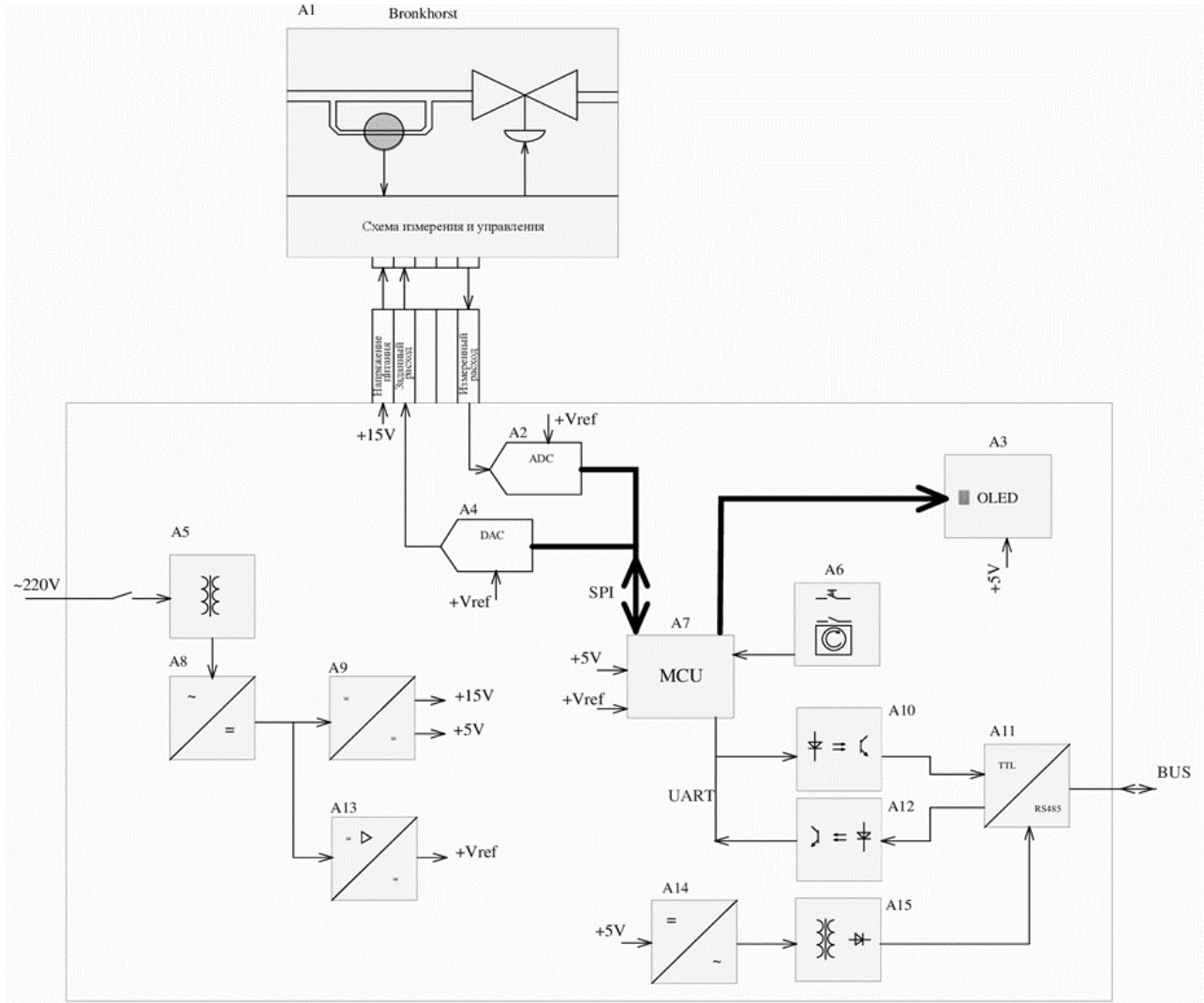


Рис. 5. Функціональна схема регулятора витрат газу

Для зручного зчитування інформації використаний дисплей OLED-типу (блок A3). Він має високу яскравість і високу контрастність, що характерно для дисплеїв зазначеного типу.

Шина для дистанційного управління та зйому інформації реалізована у вигляді інтерфейсу RS-485. Блоки A10, A11, A12, A14, A15 забезпечують перетворення логічних рівнів та гальванічну розв'язку між шиною RS-485 та мікроконтролером (UART).

Висновки: Після розробки та виготовлення декількох екземплярів регулятора витрат робочого газу було виявлено розбіжність підтримання витрат між деякими екземплярами. Розбіжність досягала 10% від номінального значення. Це призвело до необхідності калібровки регуляторів витрат робочого газу. В якості робочого газу під час калібровки використовувався аргон. Калібровка здійснювалась шляхом витиснення газу. В результаті калібровки кожного регулятора витрат робочого газу отримана точність підтримання витрат не гірше 1,5%.

Використання блоків, які виготовляються серійно, дозволило суттєво зменшити строки та витрати на розробку та виготовлення лабораторних регуляторів витрат робочого газу, призначених для лабораторних випробувань електричних ракетних двигунів.

Калібровка регуляторів дозволила забезпечити точність підтримання витрат робочого газу, необхідну для проведення лабораторних досліджень електричних ракетних двигунів, зокрема двигунів холовського типу.

Розроблений регулятор дозволяє легко переходити від одного робочого газу до іншого шляхом програмного переключення констант, визначених для кожного робочого газу.

Лабораторний регулятор витрат робочого газу дозволяє визначити та оптимізувати робочі процеси подачі робочого газу в електричні ракетні двигуни з метою отримання рекомендацій щодо проектування бортових систем подачі, а також відпрацювання алгоритмів роботи бортової системи управління електричної ракетної двигунної установки.

Бібліографічні посилання

1. Datasheet F-201CV Mass Flow Controller for Gases. <http://www.bronkhorst.com/files/downloads/datasheets/el-flow/f-201cv.pdf> .

2. Thompson R., Gray H. “The Xenon Regulator and Feed System for Electric Propulsion Systems”, ІЕРС-2005-066, November, 2005

3. Bushway III, Edward D.; Perini, Richard; “Proportional Flow Control Valve (PFVC) for Electric Propulsion Systems”, AIAA 2000-3745, July 2000.

4. Bushway III, Edward D.; King, Paul T.; Engelbrecht, Carl; Werthman, Lance; “A Xenon Flow rate Controller for Hall Current Thruster Applications”, ІЕРС-01-315.

5. Barbarits, Joseph K.; Bushway III, Edward D.; “Xenon Feed System Development”, AIAA 2003-4879, July 2003.

Надійшла до редакції 20.06.2017