

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

С. А. Плетень, А. Н. Петренко

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина 72, г. Днепр,
49010, Украина*

Анотация. Рассмотрены электрические ракетные двигатели (ЕРДУ) с использованием холловского двигателя. Структура ЕРДУ включает: холловский двигатель (ХД), систему хранения и подачи рабочей среды (СЗП), систему преобразования энергии бортового источника и систему автоматического управления и контроля текущих параметров двигательной установки. Задача заключается в разработке информационно-измерительной системы (ИИС), которая позволяет осуществлять измерение текущих параметров двигательной установки, проводить их математическую обработку и регистрацию для дальнейшего анализа. ЕРДУ – сложная физическая система, состоящая из подсистем, в которых протекают различные физические процессы. Эти процессы характеризуются значительным количеством параметров и характеристик, которые необходимо измерять и контролировать в процессе работы ЕРДУ. Перечислены параметры ЕРДУ, которые необходимо измерять в процессе функционирования двигательной установки. Определены информативные признаки лабораторных и бортовых подсистем ЕРДУ. Обоснована необходимость разработки информационно-измерительной системы и необходимость создания двух различных ИИС – для использования в составе лабораторного оборудования, что позволяет исследовать и оптимизировать подсистемы ЕРДУ и использования в составе бортовой системы управления и контроля. Лабораторная ИИС обеспечивает измерение параметров и условий тестирования в вакуумной камере; режимы работы источников питания двигательной установки; режимы работы СЗП; температурные режимы подсистем ЕРДУ (анодного блока, катода, системы подачи, системы преобразования энергии); тягу холловского двигателя, а также формирование сигналов управления источниками питания, величиной потерь рабочей среды и лабораторным оборудованием. Бортовая ИИС обеспечивает измерение тока и напряжения разряда между анодом и катодом; ток клапанов системы подачи; уровень высокого и низкого давления СЗП; температуры анодного блока, катода, системы преобразования энергии. Сформулированы задачи, которые выполняются лабораторной и бортовой ИИС. Проведен выбор аппаратных средств реализации ИИС. Проведена работа по созданию программных средств, которые обеспечивают функционирование лабораторной ИИС.

Ключевые слова: ИНФОРМАЦИОННО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ЕЛЕКТРИЧНА РАКЕТНА ДВИГУННА УСТАНОВКА, ХОЛЛОВСЬКИЙ ДВИГУН, СИСТЕМА ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПОДАЧІ РОБОЧОЇ РЕЧОВИНИ, СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ, ОБРОБКА ДАНИХ.

Abstract. Considered electric propulsion systems (EPS) based on the Hall effect. Structure of EPS includes hall thruster (HT), xenon feed system (XFS), power processing unit and automatic control and monitoring system. The task is to design information-measuring system (IMS), which allows measurement of the current settings of EPS, conduct their mathematical processing and registration for further analysis. EPS is a complex physical system consisting of subsystems within which different physical processes. These processes are characterized by a large number of parameters and characteristics to be measured and controlled in the process EPS. Listed EPS parameters that should be measured in the operation of system. Determined informative signs of laboratory and onboard subsystems EPS. The necessity of development of information-measuring system and the need to create two different IMS - for use in laboratory equipment for research and testing of subsystems and EPS use in an onboard system management and control. Laboratory IMS provides measurement parameters and test conditions in a vacuum chamber; modes of power processing unit; XFS modes; EPS temperatures subsystem (anode, cathode, supply system, power conversion system); thrust of hall-effect thruster and forming control signals for power sources, flow of propellant and laboratory equipment. Onboard IMS provides measuring current and voltage discharge between the anode and the cathode; valve current of XFS; high and low level pressure of XFS; the temperature of the anode block, cathode, power processing unit. Formulated the tasks performed by the laboratory and on-board IMS. Made choice of hardware implementation of the IMS. The work on the creation of software for the operation of the IMS.

Keywords: INFORMATION-MEASURING SYSTEM, ELECTRIC PROPULSION SYSTEM, HALL THRUSTER, XENON FEED SYSTEM, POWER PROCESSING UNIT, MEASUREMENT OF PARAMETERS, DATA PROCESSING.

Аннотация. Рассмотрены существующие электрические ракетные двигательные установки (ЭРДУ) на эффекте Холла. Перечислены параметры ЭРДУ, которые необходимо измерять. Определены информативные признаки лабораторных и бортовых подсистем ЕРДУ. Обоснована необходимость разработки информационно-измерительной системы (ИИС) и необходимости создания двух различных ИИС

- для использования в составе лабораторного оборудования, позволяющая исследовать и обрабатывать подсистем ЭРДУ и использования в составе бортовой системы управления и контроля. Сформулированы задачи, выполняемые лабораторной и бортовой ИИС. Проведен выбор аппаратных средств реализации ИИС. Проведена работа по созданию программных средств, обеспечивающих функционирование лабораторной ИИС.

Ключевые слова: ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАКЕТНАЯ ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ХОЛЛОВСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ, СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА, СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ, ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ОБРАБОТКА ДАННЫХ.

Введение

Электрические ракетные двигательные установки (ЭРДУ) все шире применяются на космических летательных аппаратах (КЛА). Эти двигательные установки применяются для решения следующих задач: ориентация и стабилизация КЛА, поддержание параметров орбиты, перевода КЛА с одной орбиты на другую, торможение КЛА после окончания срока функционирования.

ЭРДУ представляет собой сложную техническую систему, состоящую из ряда подсистем: электрического ракетного двигателя (ЭРД), системы хранения и подачи рабочего вещества (СХП), системы преобразования энергии (СПЭ) и системы автоматического управления и контроля (САУ). Структуру ЭРДУ в общем виде можно представить, как показано на рис. 1.

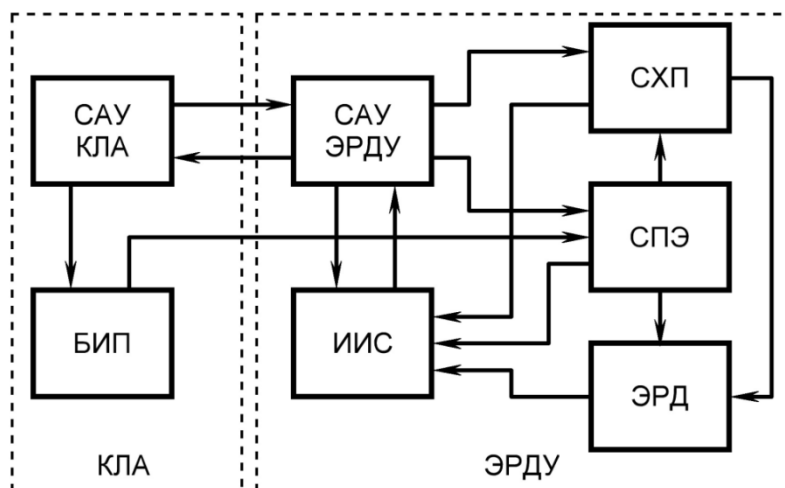


Рисунок 1 – Структурная схема ЭРДУ и её связь с КЛА

На рис. 1. кроме подсистем ЭРДУ показаны: бортовой блок управления КЛА (САУ КЛА), бортовой источник электропитания КЛА (БИП) и информационно-измерительная система (ИИС).

Постановка задачи

Необходимость разработки ИИС связана с тем, что ЭРДУ является сложной физической системой, состоящей из ряда подсистем, в которых протекают разнородные физические процессы, характеризующиеся большим числом

параметров и характеристик, которые необходимо контролировать в процессе работы ЭРДУ. Исходя из этого ИИС включает: датчики, необходимых для измерения параметров ЭРДУ, цифровое устройство, обеспечивающее прием, обработку и хранение данных.

Решение задачи

ЭРДУ на базе холловского двигателя характеризуется следующими переменными:

- U_d, I_d – напряжение и ток разряда в ускорительном канале холловского двигателя;
- I_{em} – ток электромагнита, от которого зависит магнитная индукция в ускорительном канале;
- I_h – ток нагревателя полого катода;
- U_{iv} – напряжения, подаваемые на клапаны СХП;
- \dot{m}_1 – массовый расход рабочего вещества, подаваемый в анод холловского двигателя;
- \dot{m}_2 – массовый расход рабочего вещества, подаваемый в полый катод;
- p_i – значения давления рабочего вещества, измеряемого в заданных точках СХП;
- T_i – значения температуры, измеряемой в заданных точках ЭРДУ.

В ходе лабораторных испытаний дополнительно измеряются следующие параметры:

- F – тяга двигателя;
- p_{vc} – давление в вакуумной камере;
- P_{max} – максимальная потребляемая мощность ЭРДУ.

Следует отметить, что ИИС для лабораторной установки и бортовой ЭРДУ обеспечивает решение различных задач.

Лабораторная ИИС обеспечивает решение следующих задач:

- 1) Измерение и контроль параметров ЭРДУ и лабораторного оборудования.
- 2) Обработка, запись и хранение экспериментальных данных.
- 3) Визуальное отображение экспериментальных данных.
- 4) Установка рабочих режимов узлов ЭРДУ для проведения экспериментов и получения экспериментальных данных.
- 5) Управление режимами работы ЭРДУ и лабораторным оборудованием



Рисунок 2 – Структурная схема лабораторной ИИС

Лабораторная ИИС (рис. 2) обеспечивает измерение токов и напряжений различных подсистем ЭРДУ, величины давления в заданных узлах СХП и вакуумной камере, температуру подсистем ЭРДУ (анодного блока, катода, системы подачи, системы преобразования энергии) и тягу испытываемого ЭРД, а также управление источниками питания,

величиной расхода и лабораторным оборудованием.

Первый модуль позволяет измерять ток и напряжение. Второй модуль позволяет измерять температуру. Третий модуль обеспечивает измерения давления. Четвертый модуль обеспечивает измерения расхода рабочего вещества. Пятый – обеспечивает подключение тягомера. Шестой модуль – формирующий, позволяет

задавать управляющее напряжение для источника разряда, источника поджига, источника электромагнита и источника нагревателя катода. Седьмой – обеспечивает настройку расходомера. Восьмой модуль позволяет производить коммутацию силовых цепей стендового оборудования. Все модули гальванически развязаны от платы управления и подключены с использованием последовательной шины данных CAN, что позволяет управлять ПК.

На базе персонального компьютера (ПК) организованы: сервер обработки данных (СОД), сервер хранения данных (СХД) и блок визуализации/управления (БВУ). Для подключения СОД к шине данных используется адаптер CAN-USB. СОД опрашивает измерительные модули, преобразует полученную информацию и отправляет на СХД и БВУ. СХД обеспечивает запись информации в базу данных о ходе проведения экспериментов и обеспечивает хранение этой информации. БВУ позволяет выводить полученную информацию в режиме реального времени (в виде графиков и цифровых значений). Также БВУ позволяет задавать значения токов и напряжений источников электропитания, задавать расход для элементов ЭРДУ и управлять режимами работы оборудования испытательного стенда.

Для создания лабораторной ИИС были использованы следующие аппаратные средства: восемь модулей (5 измерительных, 3 управляющих); датчики: токов, напряжений, температуры, давления и расхода; устройство измерения тяги; источники: разряда, поджига, электромагнита и нагревателя катода; адаптер CAN-USB; ПК.

Для реализации программной части ИИС (управление модулями, сервер обработки данных, сервер базы данных, клиентская часть (устройство визуализации и управления)) использован язык программирования C/C++. Клиентская часть состоит из четырех частей:

- 1) программа, позволяющая строить двумерные графики фиксируемых данных в режиме реального времени, задавать значения таких параметров как ток/напряжение и включать/выключать питание элементов ЭРДУ;
- 2) программа, позволяющая выводить записи проведенных экспериментов (двухмерные графики) хранящиеся на сервере баз данных;
- 3) программа построения трехмерных графиков и
- 4) программа отображения/управления испытательным стендом.

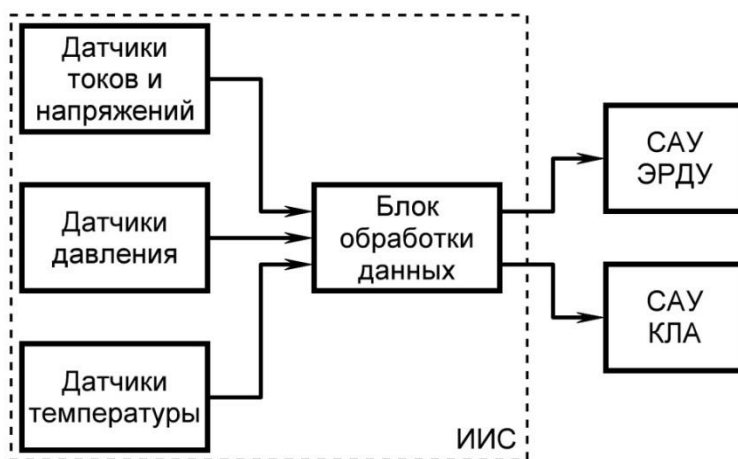


Рисунок 3 – Структурная схема бортовой ИИС.

Бортовая ИИС обеспечивает решение следующих задач:

- 1) Прием команд с САУ КЛА на включение и выключение.

- 2) Формирование последовательности команд на включение и выключение ЭРДУ.
- 3) Измерение и контроль параметров ЭРДУ.

4) Обработка измерений и выдача команд на управление ЭРДУ.

5) Формирование сигналов телеметрии и передача их в бортовую САУ.

Исходя из перечисленных задач, решаемых бортовой ИИС, предложена структурная схема, представленная на рис. 3.

Бортовая ИИС производит измерение тока и напряжение разряда между анодом и катодом; токи клапанов системы подачи; уровень высокого и низкого давления СХП; температуры анодного блока, катода, системы преобразования питания. Все измеренные параметры обрабатываются и формируются последовательные сигналы управления ЭРДУ, отправляемые на САУ, а также формируются пакеты данных для телеметрии, которые поступают на САУ КЛА.

Выводы

Проведен анализ элементов электрической ракетной двигательной установки, работающей на эффекте Холла.

Определены информативные признаки лабораторной и бортовой подсистемы ЭРДУ. Обоснована необходимость разработки информационно измерительной системы и необходимость создания двух различных ИИС – в составе бортовой и лабораторной ЭРДУ.

Сформулированы задачи, выполняемые лабораторной и бортовой ИИС. Проведен выбор аппаратных средств реализации ИИС. Проведена работа по созданию программных средств, обеспечивающих функционирование ИИС.

Библиографические ссылки

1. Архипов А. С., Ким В. П., Сидоренко Е. К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: МАИ, 2012. 292 с.
2. Малайчук В. П., Петренко О. М., Рожковський В. Ф. Обробка вимірювань і сигналів неруйнівного контролю. Д.: РВВ ДНУ, 2010. 140 с.
3. Петренко А. Н., Малайчук В. П. Автоматический контроль параметров электрических ракетных

двигательных установок // Вісник Дніпропетровського університету. № 4. Т. 25. 2017. Серія: Ракетно-космічна техніка. Випуск 20. С. 62-70.

4. Петренко А. Н., Малайчук В. П. Алгоритмы автоматического контроля параметров электрических ракетных двигательных установок // Вісник Дніпропетровського університету. № 4. Т. 25. 2017. Серія: Ракетно-космічна техніка. Випуск 20. С. 70-78.

5. Goebel D., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 486 p.

6. Herscovitz J., Zuckerman Z., Lev D. LiteEPS – A New Affordable System Developed at Rafael for Large LEO Constellations // Georgia Institute of Technology. Presented at the 35th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2017-212, Atlanta, Georgia, USA, October 8-12, 2017.

Надійшла до редколегії 21.11.2019р

Сведения об авторах



Плетень Сергей Александрович, Украина. Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара. Аспирант. Сфера интересов - автоматизация и измерение.



Петренко Александр Николаевич, Украина. Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара. Профессор, доктор технических наук. Сфера интересов - электрические ракетные двигатели.