

УДК 621.455.32

А. В. ЛОЯН¹, М. Ю. ТИТОВ¹, Я. В. БУЧИНСКИЙ², Ю. Б. ГЛАДЬО²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *КП «Дельта», Украина*

ИСПЫТАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ «МЯГКОГО» ЗАПУСКА ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе представлены результаты испытаний специализированного источника электропитания Д400-08-01Ц производства КП «Дельта» совместно со стационарным плазменным двигателем, а также с катодом-нейтрализатором. В режиме стабилизации напряжения источник питания обеспечивает «плавный» запуск двигателя без «длительных» бросков тока чувствительных для самого источника. Приведены характеристики источника питания, его функциональная схема, описан принцип работы. Приведены электрические схемы включения источника питания при работе двигателя и катода-нейтрализатора. Представлены осциллограммы тока и напряжения разряда во время запуска двигателя и катода.

Ключевые слова: источник питания, стационарный плазменный двигатель, основной разряд.

Введение

Электрореактивные двигательные установки (ЭРДУ) на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) широко используются для коррекции орбит космических аппаратов.

Система питания и управления (СПУ), входящая в состав ЭРДУ, обеспечивает электропитание всех ее элементов, и, таким образом, в значительной степени определяет эксплуатационные и выходные характеристики [1]. Так, например, по массе и габаритам СПУ составляет не менее 50% от всей ЭРДУ [2].

Наиболее массивным преобразователем СПУ является источник питания основного разряда (ИПОР). Известно, что в момент запуска двигателя в цепи ИПОР возникают скачки электрического тока длительностью до 300 мкс и в 5 раз превышающие номинальный рабочий ток [3]. Это приводит к снижению надежности блока и к необходимости увеличения мощности блока, а соответственно и массы.

В МНТЦ КЭД ЭРД «ХАИ» (г. Харьков) ведется разработка СПД различной мощности, а также катодов-нейтрализаторов. Ранее в качестве ИПОР использовались источники питания с последовательно включенным балластным сопротивлением, без стабилизации тока/напряжения разряда. В данной работе представлены результаты испытаний источника стабилизированного напряжения с ограничением по току Д400-08-01Ц (КП «Дельта», г. Тернополь) в качестве ИПОР.

КП «ДЕЛЬТА» [4]

Коллективное предприятие "Дельта" основано на базе отдела по разработке систем управления антеннами Конструкторского бюро "Проминь". Сначала как государственное малое предприятие, а с 1991 года функционирует, как самостоятельное предприятие.

Предприятие имеет свои производственные площади, оборудование, замкнутый цикл - разработка, изготовление и испытание.

За время существования предприятие разработало, изготовило и осуществило монтаж многих различных систем управления для ведущих предприятий в антенной технике, таких как: Тернопольское ГНТП "Проминь", Киевское АО "УкрСАТ", ООО НТФ "Квазар-плюс", ГНОП "КОНЕКС", многих в/ч, русских предприятий Государственная "Космическая связь", АО "Текком", АО "Сат-Тел", казахского предприятия "Жарык" и многих других.

Предприятие освоило выпуск и постоянно обновляет ряд источников питания (лабораторные, для сигнализации, для АТС, для аппаратуры на судах с сертификатом Регистра судоходства Украины, преобразователи напряжения (DC/AC, DC/DC), зарядные устройства, модули питания для сельских АТС, стабилизаторы сетевого напряжения с двойным преобразованием, регуляторы температуры, многофункциональные таймеры и др. Изделия успешно работают уже многие годы в разных отраслях Украины, России и Казахстана.

Продукция предприятия высокого качества подтверждена сертификатами УкрСЕПРО, Сертификатом о типовом одобрении и Сертификатом о признании изготовителя Регистром судоходства Украины.

Ведущие специалисты имеют большой опыт конструкторской и научной работы, включая полезные модели и изобретения. Успешно выполнены ряд НИР и ОКР совместно с ведущими предприятиями для разных отраслей промышленности, в том числе и для оборонной промышленности.

Все изделия могут работать в круглосуточном режиме при максимальной номинальной нагрузке.

МНТЦ КЭД «ХАИ» [5]

В 1995 г. с целью дальнейшего развития проектирования и испытания узлов, агрегатов и систем электроракетных двигательных установок и бортовых солнечных энергосистем космических летательных аппаратов совместным решением Министерства образования Украины и Национального космического агентства Украины (приказ-постановление №313/227 от 29.12.1995г.) создан Межотраслевой научно-технический центр космической энергетики и двигателей (МНТЦ КЭД) при Харьковском авиационном институте, на базе действующего в институте, научно-технического центра космической техники и технологии.

Коллектив отдела электроракетных двигателей, входящий в состав МНТЦ КЭД ХАИ.

Отделение ЭРД, ныне входящее в состав МНТЦ КЭД ХАИ, было создано на базе кафедры энергоустановок и двигателей космических летательных аппаратов (1972 г.), однако первые исследования в этой области в ХАИ начались значительно ранее. Во время создания кафедры основное внимание уделялось вопросам ядерной и термоядерной энергетики, созданию принципиально новых на то время ионно-плазменных двигателей. Базу научного направления проблем создания высокоэффективных электроракетных двигателей заложили такие ученые, как академик Корсунский М.И., профессор М. А. Хижняк и профессор В. М. Ершов. Большим импульсом в развитии данных работ стало открытие в 1960г. в ХАИ отраслевой научно-исследовательской лаборатории, где работали молодые и талантливые инженеры Н. В. Белан, К. В. Безручко, В. М. Рашкован., В. Ф. Гайдуков, А. И. Оранский, В. О. Пимкин, М. О. Маштылев, А. С. Долгов., В. П. Демущий и других. В этот период решалась комплексная проблема создания первой в СССР электродвигательной установки (ЭРДУ) на основе мощных импульсных плазменных двигателей. В ХАИ с 1967 г. под руководством В. Н. Ершова в лаборатории новой техники начались широкомас-

штабные исследования по двум направлениям: электроракетные двигатели разных типов и бортовые космические энергоустановки. Развитие научного направления ЭРД осуществлялось в тесной научно-технической кооперации с Государственным конструкторским бюро «Южное», Днепропетровским государственным университетом, Институтом технической механики НАНУ, Национальным центром «Харьковский физико-технический институт», ОКБ «Факел» и другими организациями. Результаты работ эффективно использовались в реализации государственной космической программы Украины в 1994-1997 гг. по темам «Международная орбитальная станция», «Форсаж-Факел», «Лыбидь», «Сич-2М» и другие.

Со второй половины 90-х гг. основные усилия коллектива отделения ЭРД были сосредоточены на создании ЭРД малой и средней мощности для мини и микро спутников, а также на разработке безнакальных полых катодов быстрого старта для наземного и космического применения.

1. Источник питания Д400-04-01Ц

Источник предназначен для питания постоянным током различных радиотехнических устройств, а также для использования в качестве лабораторных источников питания при разработке, настройке и ремонте радиоэлектронной аппаратуры. Источник имеет плавную установку выходного напряжения и тока, режим стабилизации напряжения и тока, а также автоматический переход в режим стабилизации тока.

Источник соответствует ТУ У-1497468.001-95 и сертификату № UA1.018.08138-96.

Отличительные особенности изделия:

- высокая стабильность выходного напряжения и тока;
- возможность круглосуточной работы;
- возможность использования источника питания в качестве зарядного устройства аккумулятора;
- защита от короткого замыкания и перегрузки;
- высокая надёжность и пожаробезопасность;
- небольшие габариты и масса.



Рис. 1. Внешний вид источника питания Д400-08-01Ц

1.1. Технические характеристики Д400-08-01Ц

Таблица 1
Технические характеристики Д400-08-01Ц

| | |
|--|-------------------------|
| Фазное напряжение питания, В | 198 - 250 |
| Частота сети, Гц | 50 - 60 |
| Выходное напряжение, В | 0 - 400 |
| Максимальный выходной ток, А | 0 - 8 |
| Нестабильность напряжения в режиме стабилизации напряжения, мВ | менее 0,5 |
| Нестабильность тока в режиме стабилизации тока, % | менее 1,0 |
| Пульсации выходного напряжения в режиме стабилизации напряжения: - эффективного значения, % - амплитудного значения, % | менее 0,1 менее 0,25 |
| Максимальная выходная мощность, Вт | 3200 |
| КПД, % | более 90 |
| Габаритные размеры, мм | 482x390x105 |
| Масса, кг | менее 8,2 |

1.2. Функциональная схема и принцип работы

На рис. 2. Представлена функциональная схема источника питания Д400-08-01Ц.

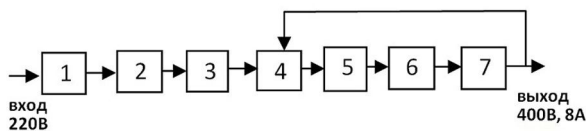


Рис. 2. Функциональная схема Д400-08-01Ц:
1 – входной высокочастотный фильтр; 2 – низкочастотный выпрямитель; 3 – корректор формы входного тока; 4 – полумостовой широтно-импульсный преобразователь; 5 – высокочастотный трансформатор; 6 – высокочастотный выпрямитель; 7 – выходной высокочастотный фильтр

Принцип работы источника питания состоит в следующем. Входное переменное напряжение 220В поступает на входной высокочастотный фильтр 1, который не пропускает высшие гармоники высокочастотного сигнала в сеть 220В. Низкочастотный выпрямитель 2 преобразует переменное входное напряжение в постоянное. Корректор формы тока 3 устраняет искажения формы входного тока. На выходе корректора формы тока 3 образуется постоянное стабилизированное напряжение величиной 400В, которое поступает на полумостовой широтно-импульсный преобразователь 4. Преобразователь 4 преобразует постоянное напряжение 400 В в переменное широтно-импульсное стабилизированное

напряжение, которое поступает на высокочастотный трансформатор 5. Трансформатор 5 служит для гальванической развязки между входным и выходным напряжениями. Переменное высокочастотное напряжение трансформатора 5 поступает на высокочастотный выпрямитель 6, который выделяет постоянную составляющую из высокочастотного напряжения. Высокочастотный фильтр 7 сглаживает пульсации высокочастотного напряжения фильтра 6. Стабилизация выходного напряжения достигается при помощи обратной связи с выхода на вход преобразователя 4. Кроме того в состав преобразователя 4 входит датчик тока, который ограничивает выходной ток на заданном уровне. Таким образом, источник питания имеет режимы стабилизации напряжения и тока и автоматический переход в режим стабилизации тока при токе нагрузки большем от установленного и наоборот.

2. Линейка стационарных плазменных двигателей и катодов-нейтрализаторов

В МНТЦ КЭД «ХАИ» разработана серия СПД различной мощности (рис. 2). Номинальные рабочие характеристики двигателей приведены в таблице 2.

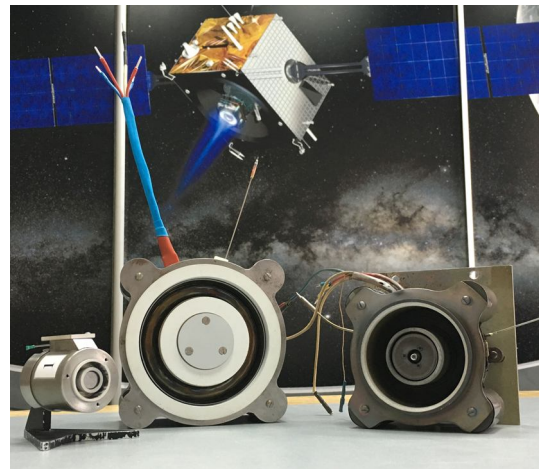


Рис. 2. Стационарные плазменные двигатели: слева направо – СПД-20М, СПД-М100, СПД-М70

Таблица 2
Характеристики СПД «ХАИ»

| | СПД-20М | СПД-70М | СПД-100М |
|-------------------------|---------|---------|----------|
| Мощность, Вт | 120 | 600 | 1450 |
| Тяга, мН | 5 | 41 | 84 |
| Разрядное напряжение, В | 300 | 300 | 300 |
| Удельный импульс, с | 1600 | 1700 | 1650 |
| К.п.д., % | 35 | 52 | 50 |
| Масса, кг | 0,24 | 1,3 | 2,5 |

Разработанные катоды (рис. 3, табл. 3) охватывают широкий диапазон по токам нейтрализации от 0,15 до 200А.



Рис. 3. Линейка катодов-нейтрализаторов: слева направо – М16-20А (1 шт.), М10-5А (2 шт.), М10-2А (3 шт.), М06-05А (3 шт.)

Таблица 3

Характеристики КН «ХАИ»

| | М06-05А | М10-2А | М10-5А | М16-20А | М16-50А | М18-200А |
|-----------------|---------|--------|--------|---------|---------|----------|
| Ток, А | 0,2–1 | 1–4 | 2–7 | 10–30 | 10-70 | 25-200 |
| Ресурс, тыс. ч. | 17 | 20 | 20 | 20 | 27 | 30 |
| Масса, г. | 7 | 15 | 30 | 41 | 77 | 180 |

3. Запуск и работа СПД и КН от Д400-08-01Ц

3.1. Питание основного разряда СПД

Схема электропитания СПД представлена на рис. 4. Катушки магнитной системы запитаны от лабораторных источников LabTools 30V15A от BVP Electronix. Для запуска катода используется стендовый 900 В источник питания на базе 3-фазного трансформатора с выпрямителем. Для ограничения тока в цепи поджигающего электрода установлен резистор 10 кОм. В качестве ИПОР использовался Д400-08-01Ц.

На рис. 5 приведена осциллограмма запуска СПД-М100 на режиме близком к номинальному. Запуск осуществлялся с включенными источниками катушек магнитной системы. Ток катушек на момент запуска устанавливался равным 50% от номинального тока. По приведенной осциллограмме видно, что в момент запуска основного разряда (появление тока в цепи) происходит провал напряжения до ≈ 140 В. В течение менее секунды происходит увеличение напряжения до выставленных 300 В. Такое поведение объясняется особенностью источника питания и настройками обратной связи. В момент пробоя наблюдается бросок разрядного тока более чем 25 ампер, однако длительность

броска тока не превышает 40 мкс и соответствует разрядке выходной емкости, при этом транзисторы выходного каскада не «чувствуют» этих перегрузок.

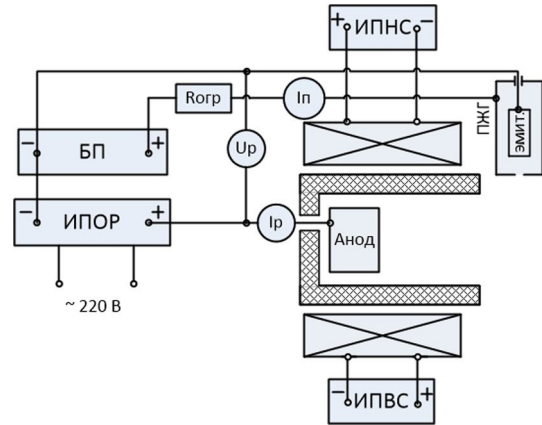


Рис. 4. Электрическая схема питания СПД: ИПОР – источник питания основного разряда; БП – блок поджига; ИПВС – источник питания внутренней катушки, ИПНС – источник питания наружных катушек; пжк – поджигающий электрод катода; эмит – эмиттер катода

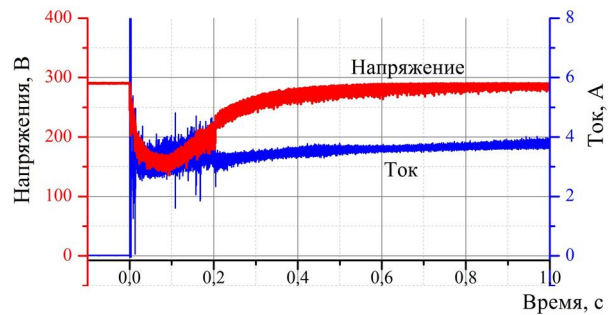


Рис. 5. Осциллограмма запуска СПД-М100 от источника питания Д400-08-01Ц

3.2. Питание КН в диодном режиме

Диодный режим работы катода-нейтрализатора широко используется при испытаниях катода. В этом случае возможна проверка работы катода как отдельного устройства – КН «работает» не на струю двигателя, а на металлическую пластину под положительным потенциалом, и, таким образом, исключается влияние двигателя.

Электрическая схема испытаний катода в диодном режиме представлена на рис. 6.

Перед запуском КН между катодом и кипером, а также катодом и анодом «дежурят» 300В постоянного напряжения (в качестве БПА использовался Д400-08-01Ц). После подачи 600 В между катодом и поджигающим электродом происходит пробой в цепи поджига с последующим появлением токов в киперной и анодной цепях. На рис. 7 представлена осциллограмма тока и напряжения в анодной цепи. В те

чение первых 3 – 6 секунд разряд в анодной цепи неустойчивый, происходит «моргание» разряда, объясняемое переходными тепловыми и газовыми процессами. Через 6 секунд наблюдается стабильная работа катода. Ток при этом принудительно ограничивается установленным на источнике питания 4,7 А, а напряжение уменьшается с ≈ 35 В до 20-25 В в течение 5-10 минут (выход на стационарный тепловой режим).

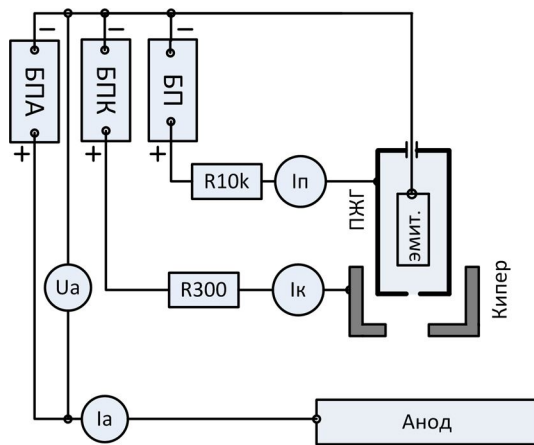


Рис. 6. Электрическая схема питания КН в диодном режиме:

БПА – блок питания анода; БПК – блок питания кипера; кипер – электрод «кипер»

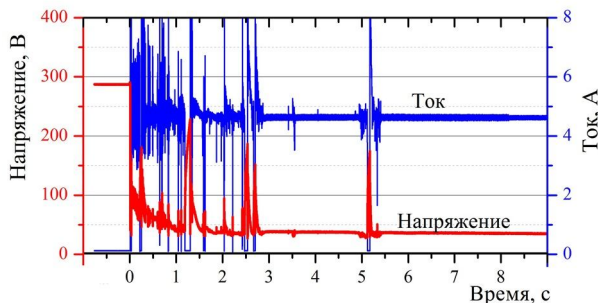


Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения КН М10-5А при питании от Д400-08-01Ц

Выводы

Таким образом, показано, что запуск двигателя может осуществляться в «плавном» режиме без забросов разрядного тока. Используемый источник питания Д400-08-01Ц отлично зарекомендовал себя при испытаниях как СПД, так и катодонейтрализаторов. К.п.д. источника во всем диапазоне стабилизации тока и напряжения не ниже 90 %, и может быть увеличен до 96% за счет выбора более качественной элементной базы и настройки блока на одну рабочую точку, что делает его перспективным для применения в СПУ ЭРДУ на борту космических аппаратов.

Литература

1. Системы питания и управления электрореактивными двигательными установками автоматических космических аппаратов [Текст] / К. Г. Гордеев, А. А. Остапущенко, В. Н. Галайко, М. П. Волков // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 131–136.
2. Михайлов, М. В. устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.12 : защита 09.11.2006 / Михайлов Максим Валентинович. – Томск, 2006. – 172 с.
3. Transients during stationary plasma thruster start-up [Electronic resource] / B. Arkhipov, V. Koryakin, V. Murashko [и др.] // Proc. 3rd Int. Conf. on Spacecraft Propulsion. – Cannes, France, ESA SP-456, December 2000. – P. 311-310. – Access mode: <http://adsabs.harvard.edu/full/2000ESASP.465..311A>. – 01.06.2016.
4. КП «Дельта» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delta.te.ua/>. – 01.06.2016.
5. История создания Межотраслевого научно-технического центра космической энергетики и двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.khai.edu/ru/site/mezhotraslevoi-nauchno-te.html>. – 01.06.2016.

References

1. Gordeev, K. G., Ostapushchenko, A. A., Galaiiko, V. N., Volkov, M. P. Sistemy pitaniya i upravleniya elektroreaktivnymi dvigatel'nymi ustanovkami avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov [Power control system for electric propulsion used of automatic spacecraft]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 131-136.
2. Mikhailov, M. V. Ustroistvo zapuska i elektropitaniya stacionarnogo plazmennogo dvigatelya. Diss. kand. tekhn. nauk [Start and power supply system for stationary plasma thruster. PhD thesis]. Tomsk, 2006. 172 p.
3. Arkhipov, B., Koryakin, A., Murashko, V., Nesterenko, A., Olotin, S., Yurlev, A. Transients during stationary plasma thruster start-up. *Proceedings of 3rd Int. Conf. on Spacecraft Propulsion*, 2000, Cannes, France, ESA SP-456, pp. 311-316. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/full/2000ESASP.465..311A> (accessed 01.06.2016).
4. КП «Del'ta» [Collective enterprise «Delta»]. Available at: <http://www.delta.te.ua> (accessed 01.06.2016).
5. Istoriya sozdaniya Mezhotraslevogo nauchno-tekhnicheskogo tsentra kosmicheskoi energetiki i dvigatelei [History of Scientific and Technical Centre for Space Energy and Engines establishing]. Available at: <http://www.khai.edu/ru/site/mezhotraslevoi-nauchno-te.html> (accessed 01.06.2016).

Поступила в редакцию 1.06.2016, рассмотрена на редколлегии 14.06.2016

ВИПРОБУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ «М'ЯКОГО» ЗАПУСКУ ДЛІЯ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

А. В. Лоян, М. Ю. Тітов, Я. В. Бучинський, Ю. Б. Гладьо

У роботі представлено результати випробувань спеціалізованого джерела електроживлення Д400-08-01Ц виробництва КП «Дельта» спільно зі стаціонарним плазмовим двигуном, а так само з катодом-нейтралізатором. У режимі стабілізації напруги джерело живлення забезпечує «плавний» запуск двигуна без «тривалих» кидків струму чутливих для самого джерела. Наведено характеристики джерела живлення, його функціональну схему, описано принцип роботи. Наведено електричні схеми вмикання джерела живлення при роботі двигуна і катода-нейтралізатора. Представлено осцилограми струму і напруги розряду під час запуску двигуна і катода.

Ключові слова: джерело живлення, стаціонарний плазмовий двигун, основний розряд.

TESTS OF "SOFT" START POWER SUPPLY UNIT FOR THE STATIONARY PLASMA THRUSTER

A. V. Loyan, M. Yu. Titov, Ja. V. Buchinskij, Ju. B. Glad'o

The paper presents test results of special power supply unit D400-08-01TS of KP "Delta" together with stationary plasma thruster, as well as with cathode-neutralizer. In constant voltage mode, the power supply provides a "soft" thruster start without "long-term" surge current that is harmful to the power unit. Power characteristics, its functional block diagram and principle of operation are described. Electrical schemes of thruster and cathode neutralizer operation are described. Waveform of discharge voltage and current during start-up of the thruster and cathode-neutralizer are presented.

Keywords: power unit, stationary plasma thruster, main discharge.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Тітов Максим Юрьевич – аспирант каф. 402, Национальный Аэрокосмический Университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@khai.edu

Бучинский Ярослав Владимирович – директор предприятия КП «Дельта», Тернополь, Украина, e-mail: delta@delta.ua

Гладьо Юрий Богданович - канд. техн. наук, ведущий инженер КП «Дельта», Тернополь, Украина, e-mail: gladyo@ukr.net

Loyan Andriy Vitalevich – Candidate of Technical Science, senior staff scientist, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Titov Maksym Yurevich – PhD student, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: titov@khai.edu.

Buchinskij Jaroslav Vladimirovich – general manager of «Del'ta», Ternopol, Ukraine, e-mail: delta@delta.ua.

Glad'o Jurij Bogdanovich - Candidate of Technical Science, advanced engineer at «Del'ta», Ternopol, Ukraine, e-mail: gladyo@ukr.net.