

УДК 621.452.33: 681.2.001.56

doi: 10.32620/akt.2020.8.21

Г. С. РАНЧЕНКО, А. Г. БУРЯЧЕНКО, В. М. ГРУДИНКИН, В. В. ДАНИЛОВ

АО «Элемент», Одесса, Украина

БАЗОВОЕ ИСПОЛНЕНИЕ РЕГУЛЯТОРА АВИАДВИГАТЕЛЯ И ЕГО МОДИФИКАЦИИ

Показано, что создание унифицированной электронной аппаратуры управления и контроля для авиационных ГТД – одна из определяющих тенденций в опытно-конструкторских работах ведущих предприятий-разработчиков комплектующих изделий авиационной техники. Представлены результаты создания в АО «Элемент» ряда регуляторов вертолетных и самолетных двигателей (турбовальных и турбовинтовых), базовой моделью для которых послужил регулятор двигателя цифровой РДЦ-450М (комплектующее изделие категории А согласно классификации АП-21), разработанный для семейства турбовальных двигателей АИ-450М вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ и получивший в 2014 году Свидетельство о годности комплектующего изделия. Даны сведения о доработке серийно выпускаемого регулятора РДЦ-450М на соответствие требованиям, уточненным разработчиком двигателя по результатам сертификационных испытаний двигателя АИ-450М и государственных испытаний вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ. Показано, что доработка выполнена с учетом обеспечения максимально возможной «модифицируемости» регулятора, то есть максимального облегчения его адаптации в будущем под новые требования, включая требования по работе с другими типами двигателей, в том числе, турбовинтовыми. Описан модульный принцип построения функциональной структуры и конструкции регулятора, дана его структурная схема. Приведены данные о результатах эквивалентно-циклических испытаний доработанного под новые требования регулятора РДЦ-450М и о последующих работах по его адаптации для контроля и регулирования режимов турбовинтовых самолетных двигателей АИ-450С (включая модификации) и МС-500В-02С. Даны сведения о вновь разработанных регуляторах РДЦ-450М-С, РДЦ-450М-С-1, РДЦ-450М-С-Т-Р, РДЦ-450С-500, среди которых – регулятор двигателя, предназначенного для беспилотного летательного аппарата. Отмечено, что модульная конструкция предполагает наличие значительного количества межплатных соединений, и описаны перспективы повышения надежности регулятора, имеющего модульную конструкцию, путем использования технологии гибко-жестких плат.

Ключевые слова: комплектующее изделие авиационной техники; унификация конструктивно-технологических решений; модульная структура.

Введение

Создание унифицированной электронной аппаратуры управления и контроля для авиационных ГТД – одна из определяющих тенденций в опытно-конструкторских работах ведущих предприятий-разработчиков комплектующих изделий авиационной техники (КИ АТ). Это, в частности, было отмечено на научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД-2018), прошедшем в апреле 2018, года в рамках Международного форума двигателестроения, организованного Международной ассоциацией «Союз авиационного двигателестроения» [1].

При современном уровне технологии изготовления печатных плат и степени интеграции электронных компонентов, доступно использование унифицированных конструктивно-технологических решений, применение унифицированной аппаратно-

программной платформы. Это, в свою очередь, делает возможным обеспечение при разработке базового исполнения:

- потенциальной возможности взаимодействия с большинством типов применяемых в настоящее время датчиков и исполнительных механизмов;

- резерва по входным и выходным аналоговым и дискретным сигналам.

Такое построение базового исполнения КИ АТ позволяет адаптировать его под различные типы авиационных ГТД в сжатые сроки с минимальными затратами.

Наше предприятие, АО «Элемент», также активно использует подобные методы создания КИ АТ, в том числе – регуляторов авиадвигателей.

Базовым исполнением стал регулятор двигателя цифровой РДЦ-450М, разработанный по техническому заданию ГП «Ивченко–Прогресс» и в 2014 году после комплекса испытаний для изделия кате-

гории А согласно Авиационным правилам АП-21 получивший от Авиационного регистра Межгосударственного авиационного комитета Свидетельство о годности комплектующего изделия, а затем – аналогичное Свидетельство от Госавиаслужбы Украины [2].

1. Постановка задачи

После освоения АО «Элемент» серийного выпуска регулятора РДЦ-450М, предназначенного для управления режимами работы семейства газотурбинных (турбовальных) двигателей АИ-450М вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ, перед предприятием были поставлены новые задачи в части разработки регуляторов:

- к концу 2015 года по результатам сертификационных испытаний двигателя АИ-450М и государственных испытаний вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ были сформированы требования по уточнению реализованных в типовой конструкции регулятора РДЦ-450М законов управления двигателем и алгоритмов контроля параметров его работы;

- была поставлена задача создания регуляторов для турбовинтовых самолетных двигателей.

Проанализировав ситуацию, разработчики АО «Элемент» сочли целесообразным рассматривать эти две задачи как взаимосвязанные.

Это означало, что при доработке типовой конструкции РДЦ-450М в рамках первой задачи следовало обеспечить максимально возможную «модифицируемость» регулятора, то есть максимальное облегчение изменений в будущем под новые требования.

2. Результаты

Доработка регулятора РДЦ-450М, обеспечившая выполнение требований, уточненных по результатам сертификационных испытаний двигателя АИ-450М и государственных испытаний вертолетов Ми-2М и Ми-2МСБ, выполнена в 2016 году. В апреле 2017 года был завершен комплекс дополнительных квалификационных работ и Авиарегистром МАК выдано Дополнение №1 к Свидетельству о годности комплектующего изделия авиационной техники на модифицированный регулятор РДЦ-450М [3]. Общий вид регулятора показан на рис. 1.

На этом этапе в комплект конструкторской документации включен ряд исполнений регулятора, обеспечивающих работу со всеми сертифицированными модификациями двигателя АИ-450М, и одновременно обеспечен потенциал для последующей адаптации типовой конструкции регулятора к новым типам авиадвигателей.

Следует отметить, что такой потенциал в значительной степени присутствовал уже в первоначальном варианте разработки, а именно:

- структурирование аппаратной части регулятора и применяемая технология обеспечили возможность использования модульной конструкции, которая облегчает не только устранение возможных неисправностей, но и введение целенаправленных изменений, связанных с составом функций и их характеристиками (рис. 2);

- встроенное программное обеспечение, следуя за структурой аппаратной части, представляло собой систему программных модулей, взаимосвязанных в смысле обмена информацией и одновременно достаточно обособленных в смысле выполняемых функций.



Рис. 1. РДЦ-450М – исполнение с введенным в 2017 году главным изменением

Таким образом, внутреннюю структуру разработанного регулятора можно назвать распределенной – каждый из конструктивно обособленных модулей ответственен за выполнение одной или нескольких функций регулятора и в значительной степени автономен, разумеется, с учетом взаимосвязей в системе в целом.

При выполнении доработки РДЦ-450М под новые требования были одновременно приняты меры к созданию резерва, обеспечивающего возможность последующего наращивания как аппаратной части (в частности количества каналов приема-передачи аналоговых и дискретных сигналов), так и объема информации, обрабатываемой и хранимой в памяти микроконтроллеров, принимаемой и передаваемой по цифровым каналам информационного обмена.

Создание такого резерва при правильном выборе современных электронных компонентов, имеющих высокую степень интеграции, оказалось вполне достижимо без увеличения массогабаритных размеров регулятора и без снижения показателей надежности.

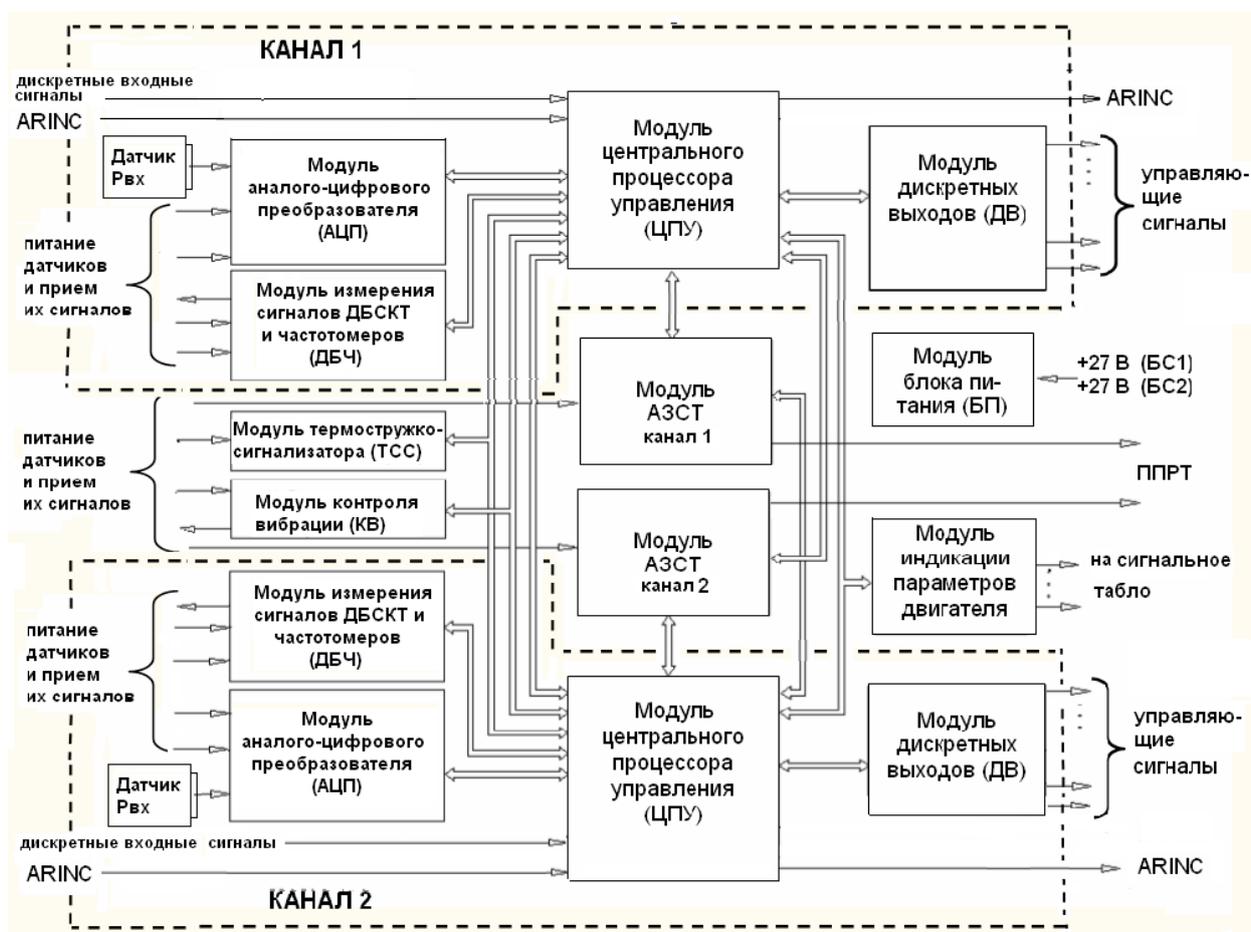


Рис. 2. Структурная схема регулятора РДЦ-450М

При доработке типовой конструкции применен микроконтроллер с ядром Cortex-M4, что обеспечило существенное повышение производительности и объема памяти по сравнению с первоначально использованным MPC555, который к тому времени несколько устарел.

Введен ряд конструктивно-технологических усовершенствований [3].

После завершения доработки и получения Дополнения №1 к Свидетельству о годности новая модификация регулятора РДЦ-450М, учитывая значительный объем внесенных изменений, было признано целесообразным экспериментально подтвердить соответствие измененной типовой конструкции требованиям по надежности. Образцы новой модификации прошли эквивалентно-циклические испытания, которые в 2018 году успешно завершились подтверждением требуемого ресурса 6000 ч, о чем выдано Дополнение №2 к Свидетельству о годности.

Таким образом, была решена задача доработки регулятора по результатам сертификационных испытаний двигателя АИ-450М и государственных испытаний вертолетов. Одновременно в процессе доработки усилены изначально заложенные предпо-

сылки облегчения модифицируемости регулятора, а тем самым подготовлена его базовая модель для создания новых модификаций, предназначенных, в частности, для управления турбовинтовыми двигателями семейства АИ-450С. Несколько таких модификаций регулятора уже созданы к настоящему времени.

Учитывая сходство условий эксплуатации регуляторов на двигателях АИ-450М и АИ-450С – перечень и характеристики внешних дестабилизирующих механических и климатических факторов и требований по электромагнитной совместимости практически идентичны – конструкция и элементная база регулятора РДЦ-450М сколько-нибудь существенному пересмотру не подвергались. Адаптация регулятора под новые алгоритмы управления и требования к взаимодействию с датчиками, исполнительными механизмами и системами самолета выполнялись посредством доработки встроенного программного обеспечения и некоторой реконфигурации части аппаратных модулей.

Интересно отметить, что один из двигателей семейства АИ-450С, под которые дорабатывалось базовое исполнение регулятора, предназначался для

беспилотного летательного аппарата. В этом случае, кроме имевших место для всех модификаций изменений алгоритмов управления, функций, регулировок, набора датчиков и исполнительных механизмов присутствовала замена постоянно обновляемого аналогового сигнала, поступающего на вход регулятора от датчиков, связанных с рычагом управления в кабине пилота, на цифровой поток данных, получаемых по радиоканалу и обновляемых значительно реже.

К нынешнему 2020 году новые модификации регулятора прошли весь необходимый комплекс испытаний и допущены к эксплуатации:

– РДЦ-450М-С в соответствии с новыми Авиационными правилами Украины АПУ-21 сертифицирован в составе двигателя;

– РДЦ-450М-С-1 квалифицирован в Авиарегистре МАК в качестве новой модификации регулятора РДЦ-450М, о чем выдано Дополнение №3 к Свидетельству о годности;

– РДЦ-450М-С-Т-Р (предназначенный для двигателя беспилотного летательного аппарата) прошел межведомственные испытания, документации присвоена литера «О1».

В настоящее время на стадии наземных испытаний в составе двигателя находится регулятор РДЦ-450С-500 для турбовинтового двигателя МС-500В-02С.

Следует отметить, что основной объем испытаний регуляторов в части проверки выполнения функций по назначению обеспечивается специально разработанными стендами-имитаторами, каждый из которых является программно-аппаратным комплексом, имитирующим двигатель как взаимодействующую с регулятором систему за счет:

– имитации всех аналоговых, дискретных и цифровых сигналов, поступающих к регулятору от датчиков, агрегатов и систем двигателя;

– приема управляющих сигналов от регулятора;

– выполнения вычислений и формирования множеств взаимозависимых значений параметров (в виде аналоговых, дискретных и цифровых сигналов), каждое из которых соответствует одному из режимов работы двигателя, согласно заранее заданным функциональными зависимостям, отражающим характеристики двигателя – математической модели двигателя.

Первый такой стенд, разработанный и изготовленный на нашем предприятии, предназначался для испытаний РДЦ-450М и, соответственно был имитатором двигателя АИ-450 [4].

В дальнейшем этот стенд, подобно регулятору, послужил базовой моделью для создания ряда новых модификаций, имитирующих новые типы дви-

гателей, для которых разрабатывались описанные выше регуляторы.

3. Перспективы

Модульная конструкция регуляторов при нынешнем уровне интеграции доступных к использованию электронных компонентов является наиболее целесообразной, как с точки зрения ремонтпригодности, так и в отношении перспектив последующей целенаправленной адаптации под новые задачи. Однако, в то же время, такая конструкция предполагает наличие значительного количества межплатных соединений, что, в свою очередь, требует особого внимания к обеспечению повышенной надежности таких соединений.

В рамках решения задачи повышения надежности разработчиками и технологами АО «Элемент» принято решение для обеспечения межплатных соединений внедрить технологию гибко-жестких печатных плат [4]. К настоящему времени изготовлены образцы регулятора РДЦ-450М с применением упомянутой технологии, начаты испытания.

Заключение

1. Создано базовое исполнение регулятора РДЦ-450М для семейства турбовальных двигателей АИ-450, модульная структура и конструкция которого обеспечивают максимальное облегчение изменений под новые требования. Базовое исполнение регулятора прошло весь комплекс испытаний, включая эквивалентно-циклические, подтвердившие требуемый ресурс 6000 ч, и имеет Свидетельство о годности КИ АТ.

2. Использование базового исполнения регулятора РДЦ-450М обеспечило сокращение сроков и трудоемкости создания новых регуляторов для турбовинтовых двигателей АИ-450С и МС-500В-02С:

– РДЦ-450М-С сертифицирован в составе двигателя согласно АПУ-21;

– РДЦ-450М-С-1 квалифицирован в Авиарегистре МАК;

– РДЦ-450М-С-Т-Р прошел межведомственные испытания;

– РДЦ-450С-500 проходит испытания в составе двигателя.

3. В рамках повышения надежности модульной конструкции, обеспечивающей улучшение характеристик ремонтпригодности и облегчение целенаправленной адаптации регулятора под новые задачи, на предприятии внедрена технология изготовления с использованием гибко-жестких печатных плат – начаты испытания первых образцов.

Литература

1. Ранченко, Г. С. Перспективы развития электронных САУ ГТД [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – №7 (151). – С. 95 – 100.
2. Регулятор двигателя АИ-450М – результаты разработки и квалификации на категорию А [Текст] / Г. С., Ранченко, А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 10 (117). – С. 93 – 98.
3. Буряченко, А. Г. Модификация типовой конструкции регулятора двигателя АИ-450М – сущность, процедуры и результаты [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко, Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2017. – № 2. – С. 86 – 89.
4. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 95 – 101.
5. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат [Текст] / А. Медведев, Г. Мьлов, П. Семенов и др. // *Компоненты и технологии*. – 2008. – № 6. – С. 147 – 160.

References

1. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Perspektivy razvitiya elektronnyh SAUGTD. [Prospects of development electronic automatic control systems for gas-turbine engines]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no.7 (151), pp. 95–100.
2. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Golubev, N. L., Danilov, V. V. Reguljator dviatelja – rezul'taty razrabotki i kvalifikacii na kategoriju A [Engine AI-450M regulator – results of development and qualification for category A]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 10 (117), pp. 93–98.
3. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Burunov, D. S., Modifikacija tipovoj konstrukzii reguljatora dviatelja AI-450M – suzhnost, prozedury i rezultaty. [Modification of the engine AI-450M regulator standard model – essence, procedure and results]. *Vestnik dvigatelestroenija – Engine building messenger*, 2017, no. 2, pp. 86 – 89.
4. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Burunov D. S. Stend-imitator turbovalnogo dviatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacij astenda. [Test bench-imitator of engine AI-450M for engine regulator testing. Metrological security and test bench verification]. *Vestnik dvigatelestroenija – Engine building messenger*, 2015, no. 2, pp. 95 – 101.
5. Medvedev, A., Mylov, G., Semenov, P., Serzhantov, A., Konstruirovanie gibkih i gibko-gestkih pechatnyh plat. [Designing flexible and flexible-rigid printed circuit boards]. *Komponenty I takhnologii – Components & Technologies*, 2008, no. 6, pp. 147–160.

Поступила в редакцию 18.06.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

БАЗОВЕ ВИКОНАННЯ РЕГУЛЯТОРА АВІАДВИГУНА ТАЙОГО МОДИФІКАЦІЇ

Г. С. Ранченко, Г. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, В. В. Данилов

Показано, що створення уніфікованої електронної апаратури управління і контролю для авіаційних ГТД – одна з визначальних тенденцій в дослідно-конструкторських роботах провідних підприємств-розробників комплектуючих виробів авіаційної техніки. Представлені результати створення в АТ «Елемент» ряду регуляторів вертолітних і літакових двигунів (турбовальних і турбогвинтових), базовою моделлю для яких послужив регулятор двигуна цифровий РДЦ-450М (комплектуючий виріб категорії А згідно з класифікацією АП-21), розроблений для сімейства турбовальних двигунів АІ 450М вертольотів Мі-2М і Мі-2МСБ і отримав в 2014 році Свідоцтво про придатність комплектуючого виробу. Дано відомості про доопрацювання серійно випускається регулятора РДЦ-450М на відповідність вимогам, уточненими розробником двигуна за результатами сертифікаційних випробувань двигуна АІ-450М і державних випробувань вертольотів Мі-2М і Мі-2МСБ. Показано, що доопрацювання виконана з урахуванням забезпечення максимально можливої «модифікуємості» регулятора, тобто максимального полегшення його адаптації в майбутньому під нові вимоги, включаючи вимоги по роботі з іншими типами двигунів, в тому числі, турбогвинтовими. Описано модульний принцип побудови функціональної структури і конструкції регулятора, дана його структурна схема. Наведено дані про результати еквівалентно-циклічних випробувань доопрацьованого під нові вимоги регулятора РДЦ-450М і про подальші роботи по його адаптації для контролю і регулювання режимів турбогвинтових літакових двигунів АІ-450С (включаючи модифікації) і МС-500В-02С. Дано відомості про знову розроблених регуляторах РДЦ-450М-С, РДЦ-450М-С-1, РДЦ-450М-С-Т-Р, РДЦ-450С-500, серед яких - регулятор двигуна, призначеного для безпілотного літального апарату. Відзначено, що модульна конструкція пе-

редбачає наявність значної кількості міжплатних з'єднань, і описані перспективи підвищення надійності регулятора, що має модульну конструкцію, шляхом використання технології гнучко-жорстких плат.

Ключові слова: комплектуючий виріб авіаційної техніки; уніфікація конструктивно-технологічних рішень; модульна структура.

BASIC MODEL OF THE AIRCRAFT ENGINE REGULATOR AND ITS MODIFICATIONS

G. Ranchenko, A. Buryachenko, V. Grudinkin, V. Danilov

It is shown that the creation of a unified electronic control and control equipment for aircraft gas turbine engines is one of the determining trends in the experimental design work of enterprises developing components of aircraft equipment. The results of the creation of some helicopter and aircraft engine controllers (turboshaft and turboprops) in JSC Element are presented. The basic model for them was the regulator RDC-450M (category A component product according to AP-21 classification), which was developed for the AI-450M family of turboshaft engines of Mi-2M and Mi-2MSB and in 2014 received the APPLIANCE DESIGN APPROVAL. There is given information concerning the mass-produced regulator RDTs-450M rework to meet the new requirements specified by the engine designer as the results of certification tests of the AI-450M engine and state tests of the Mi-2M and Mi-2MSB helicopters. It is shown that the rework was carried out taking into account the maximum possible “modifiability” of the regulator, which is the maximum ease of its adaptation in the future to new requirements, including requirements for working with other types of engines, including turboprops. The modular principle of constructing the functional structure and design of the regulator is described; its structural scheme is given. Data are given on the results of equivalent cyclic tests of the regulator RDTs-450M, which was modified to meet the new requirements, and on subsequent work on its adaptation to monitor and regulate the modes of turboprop aircraft engines AI-450C (including its modifications) and MS-500V-02S. Information is given on the newly developed regulators RDTs-450M-S, RDTs-450M-S-1, RDTs-450M-S-T-P, RDTs-450S-500, among which there is an engine regulator designed for an unmanned aerial vehicle. It is noted that the modular design assumes the presence of a significant number of board-to-board connections, and the prospects of increasing the reliability of regulator having a modular design by using the technology of flexible-rigid boards are described.

Keywords: aviation equipment component; unification of structural and technological solutions; modular structure.

Ранченко Геннадій Степанович – канд. техн. наук, головний конструктор АО «Елемент», Одеса, Україна.

Буряченко Анна Григорьевна – головний метролог АО «Елемент», Одеса, Україна.

Грудинкин Вячеслав Михайлович – заступитель главного конструктора АО «Елемент», Одеса, Україна.

Данилов Всеволод Владимирович – ведущий программист АО «Елемент», Одеса, Україна.

Gennadii Ranchenko – Candidate of Technical Science, Chief Designer of JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-1896-038X.

Anna Buryachenko – Chief Metrologist of JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: annaodessa55@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4480-6965.

Viacheslav Grudinkin – Deputy Chief Designer of JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-2766-1162.

Vsevolod Danilov – lead programmer of JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-5499-7702.