

УДК 621.452.3:681.51:004.94

Г. С. РАНЧЕНКО, А. Г. БУРЯЧЕНКО

АО «Элемент», Одесса, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ САУ ГТД

Представлен анализ основных направлений разработок электронных систем автоматического управления (САУ типа FADEC) авиационными газотурбинными двигателями, выполненный по материалам научно-технического конгресса по двигателестроению, прошедшего в рамках Международного форума двигателестроения в апреле 2018 года в Москве под эгидой Международной ассоциации «Союз авиационного двигателестроения» (АССАД). Приведен обзор современного состояния разработок специализированных научных предприятий в области применения бортовой математической модели «виртуальный двигатель» и внедрения беспроводных технологий в авиационной промышленности. Отмечено, что конструкторские бюро предприятий-изготовителей внедряют в качестве перспективных решений модульную унифицированную конструкцию САУ и вибропаспорт типа двигателя.

Ключевые слова: математическая модель «виртуальный двигатель», беспроводные технологии

Введение

В апреле нынешнего, 2018, года в рамках Международного форума двигателестроения, организованного Международной ассоциацией «Союз авиационного двигателестроения» (АССАД), прошел научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2018).

На секции «Системы автоматического управления и диагностики двигателей» были представлены доклады как о перспективных теоретических разработках со стороны ФГУП «ЦИАМ им.П.И.Баранова», так и об их практической реализации со стороны предприятий, являющихся ведущими разработчиками и изготовителями упомянутых систем – АО «ОДК-СТАР», АО «ОДК-Авиадвигатель», АО УНПП «Молния», АО «Омское машиностроительное конструкторское бюро», ПАО «НПП «Аэросила», ОАО «НПП «Темп» им.Ф.Короткова» и другие.

В совокупности представленные доклады осветили основные направления и перспективные задачи в развитии систем автоматического управления и диагностики двигателей, как признаваемые на сегодняшний день всеми ведущими разработчиками, так и являющиеся предметом некоторых противоречий.

1. Основные задачи научных разработок

Доклады, посвященные научным разработкам, внедряемым и планируемыми к внедрению в ближайшие годы, представлены ФГУП «ЦИАМ им.П.И.Баранова» по следующим направлениям:

а) применение в цифровых электронных системах автоматического управления (САУ) программного обеспечения «виртуальный двигатель», т.е. термодинамической всережимной математической модели ГТД, работающей в реальном времени и обеспечивающей:

– реализацию новых принципов управления двигателем по параметрам, непосредственно определяющим его основные характеристики, но недоступным для измерения;

– оптимальное управление при выработке ресурсов двигателя;

– повышение отказоустойчивости и качества управления за счет компенсации отказов САУ;

б) совершенствование технологий контроля технического состояния и диагностирования авиационных двигателей в эксплуатации;

в) прогнозирование ресурса электронных регуляторов на основе данных эксплуатации аналогов и прототипов;

г) формирование облика системы электропитания беспроводной САУ перспективного газотурбинного двигателя (ГТД).

Применение в САУ ГТД встроенной бортовой математической модели «виртуальный двигатель», как отмечается в ряде работ, стало актуальным в связи с ростом вычислительной мощности и быстродействия современных микропроцессоров, являющихся основой САУ.

К настоящему времени, как показано в работе ФГУП «ЦИАМ им.П.И.Баранова» [1], разработан математический аппарат и программное обеспечение «виртуальный двигатель» для применения в цифровых САУ современных ГТД. Основное назна-

чение:

- компенсация отказов датчиков параметров рабочего процесса в двигателе и параметров, характеризующих режим полета;

- управление двигателем по параметрам, недоступным для измерения, таким как запасы ГДУ компрессора, температура газа перед турбиной и тяга двигателя.

Авторы иллюстрируют возможные применения бортовой математической модели двигателя в САУ ГТД схемой, приведенной на рис. 1.

Аналогичные исследования ведутся и отечественными специалистами. Например, в работе [2] украинских ученых исследована возможность управления авиационным ГТД при помощи многомерных регуляторов с использованием ограничителей неизмеряемых параметров.

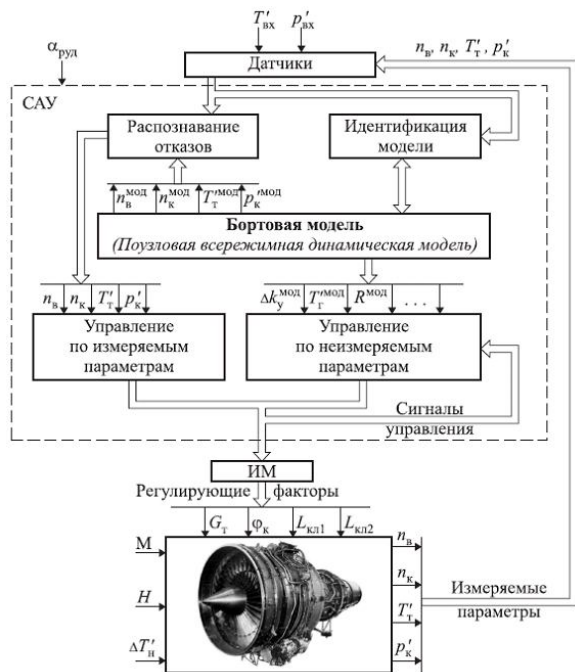


Рис. 1. Иллюстрация применения бортовой математической модели в САУ ГТД

В рамках этой тематики на секции НТКД-2018 был представлен доклад, посвященный компенсации отказов с использованием математической модели «виртуальный двигатель». Освещен метод идентификации («обучения») модели посредством формирования и обновления (для ряда параметров) зависимости разности расчетного и измеренного значений параметра от его приведенного значения. При выявлении отказа датчика какого-либо параметра регулирования:

- прекращается «обучение» модели по этому параметру;

- полученные массивы ошибок используются для формирования поправок к расчетным данным модели;

- для управления двигателем используется вычисляемое скорректированное значение параметра, при этом формирование сигнала выполняется в режиме реального времени; авторы по результатам теоретических и экспериментальных исследований оценивают погрешность расчета как 0,2 – 0,5 % на установившихся режимах и 1 – 2 % на переходных.

Ведутся работы по использованию математической модели для обнаружения множественных повреждений и обрывов рабочих лопаток двигателя с идентификацией узла проточной части двигателя, в котором локализована неисправность. В докладе, посвященном совершенствованию технологий контроля технического состояния и диагностирования авиационных двигателей в эксплуатации, наибольший интерес для разработчиков САУ ГТД представлял вопрос о внедрении расширенных схем информационного взаимодействия бортовой системы контроля и САУ.

Отдельный доклад был посвящен применению бортового программного обеспечения, в том числе модели «виртуальный двигатель», для оптимального управления двигателем при выработке его ресурсов. Учеными ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» были доложены результаты моделирования применительно к ТРДД с высокой степенью двухконтурности. Показано, что на двигателе, имеющем степень изношенности, при которой традиционное управление по частоте вращения вентилятора дает на взлетном режиме недобор тяги 25 %, удается за счет введения контура управления тягой в состав модели САУ, достичь дроссельных характеристик близких к характеристикам нового двигателя и снижения тяги не более 5 %.

В отношении прогнозирования ресурса электронных регуляторов на основе данных эксплуатации аналогов и прототипов выступавшими представителями ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» было отмечено, что Рекомендательный циркуляр Авиарегистра МАК предусматривает при эксплуатации по техническому состоянию по стратегии управления ресурсом СУР(в) установление назначенного ресурса на основании данных расчета без проведения ресурсных испытаний, однако на сегодняшний день методика установления ресурса по упомянутой стратегии не разработана. Авторами доклада предложена формула для вычисления прогнозируемого ресурса электронного регулятора, учитывающая:

- результаты расчета показателей безотказности, в частности времени наработки на отказ (методика расчета определена действующими нормативными документами);

– зависимость между показателями безотказности и ресурсом электронного регулятора и его аналога (прототипа), при этом доля отказавших к заданному времени принимается на уровне 0,95 – 0,99 для обеспечения полной выработки ресурсных возможностей;

– коэффициент идентичности регуляторов, определяемый как соотношение их показателей безотказности.

Актуальность рассматриваемой темы была подтверждена заданным сразу несколькими слушателями вопросом о том, приобрела ли предлагаемая методика статус нормативного документа. Ответ, однако, был отрицательным.

Одной из наиболее интересных тем был посвящен доклад под названием «Формирование облика системы электропитания беспроводной САУ перспективного ГТД».

Как отмечено в [3]), применение беспроводных технологий в таких критически важных системах, как управление полетом или работой двигателя, связано с рядом противоречивых требований.

С одной стороны, требуется увеличение мощности приемо-передатчиков (трансиверов) для обеспечения надежной передачи данных в режиме реального времени по радиоканалу с частотой информационного обмена от 30 до 100 Гц между узлами бортовой сети вне пределов прямой видимости с экранированием металлическими конструкциями.

В то же время электроснабжение беспроводных бортовых устройств от автономных источников питания, предотвращение влияния излучений на работу соседних радиоканалов и электронного бортового оборудования требует низкого собственного энергопотребления.

Однако отмечается, что в последние годы в авиационной промышленности начался активный процесс поиска направлений внедрения беспроводных систем и устройств, где в короткие сроки можно получить ощутимый экономический эффект и что согласно экспертным оценкам внедрение беспроводных технологий позволит:

- создать высокоэффективные системы управления, контроля и диагностики нового поколения с гибкой, легко изменяемой структурой;
- уменьшить на 20...40 % массу и габариты системы за счет уменьшения количества разъемов и кабелей;
- повысить надежность (сокращение количества разъемов и реконфигурация беспроводной сети);
- снизить в 5...8 раз затраты на техническое обслуживание систем, упростить маршрутизацию и монтаж кабелей на борту;
- упростить модернизацию систем;

– повысить пожаробезопасность.

В качестве успешных приводятся примеры применения беспроводной сенсорной сети в бортовых системах, не являющихся критическими для безопасности самолета.

Например, на авиационном рынке уже предлагается сертифицированная по RTCA/DO-160 беспроводная система контроля задымления ST3000 разработанная фирмой Securaplane technologies [3].

В докладе ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» были приведены результаты исследований, которые показали, что система электропитания беспроводной САУ перспективного ГТД (рис. 2) должна состоять из двух подсистем:

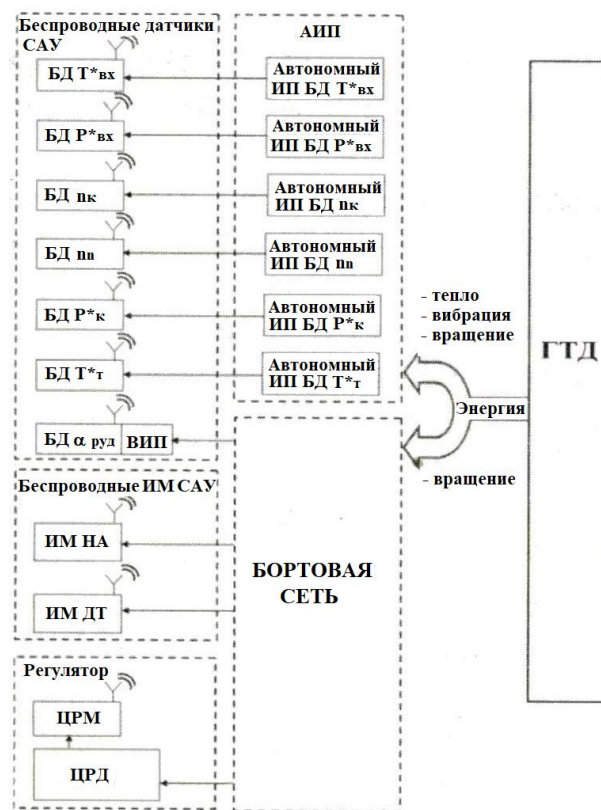


Рис. 2. Функциональная схема электропитания беспроводной САУ

– подсистемы низкого энергопотребления, построенной на основе автономных источников питания мощностью 60 – 150 мВт, обеспечивающих напряжением 2,5 – 3,3 В питание в САУ беспроводных датчиков параметров двигателя Т*вх, Р*вх, пк, пв, Р*к и Т*т и имеющих в своем составе генераторы – преобразователи энергии двигателя, устройства сбора и хранения энергии;

– подсистемы высокого энергопотребления, построенной на основе штатной бортовой электросети с использованием напряжения 27 и 270 В постоянного тока для питания цифрового регулятора двигателя;

теля мощностью 40 – 80 Вт, агрегатов с более высоким энергопотреблением, например, электроприводных насосов-дозаторов, требующих до 25 кВт электрической мощности, что не может быть обеспечено автономными источниками питания.

Питание беспроводных датчиков должно осуществляться от автономных источников питания, одним из требований к которым является максимально возможное увеличение срока службы без замены элементов питания. Этому требованию удовлетворяют источники с восстанавливаемой энергией. Учитывая, что ГТД одновременно с созданием полезной тяги выделяет в окружающую среду значительную энергию различного вида (тепло, вибрация), авторы доклада предлагают использовать эту энергию в автономных источниках питания беспроводных датчиков за счет применения термоэлектрических вибрационных и магнитоиндукционных генераторов, в технологии создания которых достигнут значительный прогресс.

Продолжение темы повышения эффективности использования энергии двигателя прозвучало в другом докладе, посвященном разработке высокотемпературного стартера-генератора, интегрированного на вал высокого давления.

Эта работа проведена авторами в рамках исследований по повышению электрификации авиационного двигателя и созданию «более электрического самолета», которые ведутся практически всеми двигателестроительными корпорациями (Rolls Royce, General Electric, PW Canada и другими).

Дело в том, что прямая интеграция электрической машины на вал высокого или низкого давления двигателя и отказ от коробки передач позволяет снизить массо-габаритные показатели двигателя и уменьшить затраты на его обслуживание.

Сообщено, что по результатам испытаний экспериментального макета высокотемпературного стартера-генератора уменьшенных размеров была разработана компьютерная модель, на основе которой спроектирован полномасштабный образец мощностью 320 кВт с учетом рабочей температуры 160 – 200 °С. Авторы заявили о готовности образца к испытаниям в составе двигателя.

2. Направления работ конструкторских бюро предприятий-изготовителей

Среди докладов представителей предприятий, являющихся разработчиками и изготовителями САУ ГТД и, в частности, цифровых регуляторов, наиболее показательны в смысле прослеживания тенденций являются, пожалуй, доклады АО УНПП «Молния» и АО «ОДК-СТАР».

Уфимская «Молния» представила результаты

работ по созданию «унифицированной электронной аппаратуры управления и контроля для авиационных ГТД». Рассказано об опытно-конструкторской работе по разработке регуляторов нового поколения на основе унифицированной аппаратно-программной платформы, в которой максимально использованы технические решения, ранее реализованные разработчиком в серийно выпускаемой сегодня аппаратуре.

Отмечается, что использование унифицированных конструктивных решений, возможность взаимодействия с большинством типов применяемых в настоящее время датчиков и исполнительных механизмов, наличие резерва по входным и выходным сигналам позволяет предприятию применять унифицированную аппаратно-программную платформу для управления авиационными ГТД различных типов – адаптация может быть выполнена в сжатые сроки с минимальными затратами.

Однако в современных условиях быстрого развития (и, соответственно, быстрого устаревания) элементной базы технические решения приходится существенно обновлять с периодичностью около пяти лет. Отвечая на вопрос слушателей, на какой срок «использования» унифицированного решения они рассчитывают, авторы выразили уверенность, что лет через десять предлагаемая платформа полностью обновится.

Таким образом, понятно, что даже успешное создание унифицированного регулятора не означает прекращения разработок регуляторов, однако позволяет ускорить и удешевить создание регуляторов для разных типов двигателей в рамках некоторого временного периода.

Доклад АО «ОДК-СТАР» носил характер краткой программы создания «САУ будущего». Приведен обзор современного мирового уровня и перспективных требований разработчиков, производителей и эксплуатантов двигателей к САУ, в частности:

- a) наработка на отказ САУ, приводящий к выключению двигателя – не менее $2 \cdot 10^6$ ч с дальнейшим увеличением до $5 \cdot 10^6$;
- b) вероятность отказа, приводящего к опасным последствиям – не более 10^{-12} ;
- c) ресурс до первого капитального ремонта:
 - для блока насосов – $2 \cdot 10^4$ ч,
 - для остальных агрегатов – $4 \cdot 10^4$ ч;
- d) назначенный ресурс:
 - для блока насосов – $4 \cdot 10^4$ ч,
 - для остальных агрегатов – $8 \cdot 10^4$ ч;
- e) рабочая температура длительно:
 - для электронных блоков – 105 °С,
 - для гидромеханических агрегатов – от 135 до 185 °С;
- f) электронная часть САУ в соответствии с

категорией B5K5M5 KT-160G должна выполнять свои функции во время воздействия испытательных импульсов, имитирующих импульсные наводки, индуцируемые молнией;

g) минимизация удельной массы САУ;

h) введение таких функций как шумоподавление, управление малоэмиссионной камерой сгорания;

i) внедрение средств ранней диагностики неисправности агрегатов, обеспечение экипажа данными о техническом состоянии в реальном масштабе времени и передача информации в наземные диагностические центры;

j) минимизация стоимости жизненного цикла двигателя и агрегатов САУ.

Интересно, что по отмеченной в перечне АО «ОДК-СТАР» теме ведения в САУ новых функций АО «ОДК-Авиадвигатель» представил доклад «Математическая модель управления малоэмиссионной камерой сгорания». Авторы представили результаты разработки математической модели, предназначенной для интеграции в электронный регулятор двигателя и использования для обучения нейросетевой модели управления малоэмиссионной камерой сгорания.

Кроме того, АО «ОДК-Авиадвигатель» представил доклад о разработке концепции системы вибродиагностики перспективного авиадвигателя, под которым понимается в первую очередь двигатель большой мощности, предназначенный для работы в составе силовой установки воздушного судна большой грузоподъемности. Дело в том, что стоимость таких судов велика и возможные потери в случае отказов могут намного превышать стоимость двигателя.

Отмечается, что параметры вибрации могут быть наиболее чувствительными к дефектам работающих агрегатов авиадвигателя, благодаря распространению упругих волн по его конструкции. Таким образом, продвинутая вибродиагностика – важнейшая составляющая системы мониторинга.

Для обеспечения детальной диагностики при эксплуатации двигателя авторами предложено создать вибропаспорт типа, опирающийся на пространственно-импульсную модель вибрации и предъявляет требования к измерению и регистрации сигналов динамических процессов с последующей обработкой данных. Частота дискретизации сигналов должна превышать 100 кГц, верхняя граница измерений – 20 кГц, динамический диапазон – 130 дБ. Важным условием является применение трехосевых датчиков вибрации.

Показательно, что работа проводится АО «ОДК-Авиадвигатель» в сотрудничестве с другими предприятиями, в том числе латвийскими – провер-

ка возможностей расширения вибрационной диагностики выполняется на базе экспериментального стенда авиационного двигателя для испытаний вибрационных технологий в Авиационном исследовательском центре в Латвии.

Заключение

Доклады, представленные на секции «Системы автоматического управления и диагностики двигателей» научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2018), прошедшего в рамках Международного форума двигателестроения в апреле 2018 года, обрисовали следующие основные задачи, признаваемые как представителями научных учреждений, так и предприятиями разработчиками-изготовителями САУ ГТД:

a) внедрение в цифровых САУ программного обеспечения «виртуальный двигатель»;

b) прогнозирование ресурса электронных регуляторов на основе данных эксплуатации аналогов и прототипов;

c) совершенствование технологий контроля технического состояния двигателей в эксплуатации и оптимизация управления при выработке ресурса;

d) внедрение беспроводных технологий и создание «электрического самолета».

Литература

1. Гольдберг, Ф. Д. Применение программного обеспечения «виртуальный двигатель» в системе автоматического управления газотурбинного двигателя [Текст] / Ф. Д. Гольдберг, О. С. Гуревич, А. А. Петухов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 47-56.

2. Епифанов, С. В. Синтез и анализ перспективной САУ ГТД [Текст] / С. В. Епифанов, Е. А. Кононыхин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 10 (107). – С. 82-86.

3. Гуревич, О. С. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту [Текст] / О. С. Гуревич, М. Г. Кессельман, А. С. Трофимов, В. И. Чернышов // Труды МАИ. – 2017. – Выпуск № 94.

References

1. Gol'dberg, F. D., Gol'dberg, F. D., Gurevich, O. S., Petuhov, A. A. Primenenie programmnogo obespechenija «virtual'nyj dvigatel'» v sisteme avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnogo dvigatelja [Application of the software "virtual engine" in the automatic control system of a gas turbine engine]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika*,

tehnologii i mashinostroenie, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 47-56.

2. Epifanov, S. V. Kononyhin, E. A. Sintez i analiz perspektivnoj SAU GTD [Synthesis and analysis of the perspective automatic control system GTE]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace tech-*

nic and technology, 2013, no. 10 (107), pp. 82-86.

3. Gurevich, O. S., Kessel'man, M. G., Trofimov, A. S., Chernyshov, V. I. Sovremennye besprovodnye tehnologii: problemy primeneniya na aviacionnom bortu [Modern wireless technologies: application problems on the aircraft board]. *Trudy MAI*, 2017, no. 94.

Поступила в редакцию 7.06.2018, рассмотрена на редколлегии 25.07.2018

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОННИХ САУ ГТД

Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко

Наведено аналіз основних напрямів розробок електронних систем автоматичного управління (FADEC) авіаційними газотурбінними двигунами, виконаний згідно матеріалів науково-технічного конгресу з двигунобудування, який пройшов у рамках Міжнародного форуму двигунобудування у квітні 2018 року у Москві під егідою Міжнародної асоціації «Союз авіаційного двигунобудування» (АССАД). Оглянуто сучасний стан розробок спеціалізованих наукових підприємств у галузі застосування бортової математичної моделі «віртуальний двигун» і впровадження бездротових технологій в авіаційній промисловості. Відмічено, що конструкторські бюро підприємств-виробників впроваджують у якості перспективних рішень модульну уніфіковану конструкцію САУ і вібропаспорт типу двигуна.

Ключові слова: математична модель «віртуальний двигун», бездротові технології

PROSPECTS OF DEVELOPMENT ELECTRONIC AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR GAS-TURBINE ENGINES

G. S. Ranchenko, A. G. Buryachenko

The analysis of the basic directions of electronic automatic control systems for aviation gas-turbine engines (FADEC) development is presented. This analysis is executed on the base of materials of the Scientific and Technical Congress of Aero-Engine Manufacturers. This Congress passed within the limits of the International engine forum in April 2018 in Moscow under aegis of the International association «Association of Aero-Engine Manufacturers» (ASSAD). The review of a modern condition of developing works of the specialized scientific enterprises in the field of application of onboard mathematical model «virtual engine» and introductions of wireless technologies in the aviation industry is given. It is noted, that design offices of manufacturers introduce as perspective decisions the modular unitized design for electronic automatic control systems and the «vibration passport» for engine type. The using of onboard mathematical model «virtual engine» provide the electronic automatic control systems with the possibility to apply the new controlling concepts and to compensate the failures of transducers which have information interchange with the automatic control system. The software «virtual engine» is developed by scientists of Central Institute of Aviation Motors (Moscow) and of Ukrainian National Aerospace University (Kharkov). The wireless technologies need the specialized power supply devices for wireless engines transducers. There is the tendency to use the engine energy (thermal engine energy, vibration engine energy) for such a power supply devices which is to be built on the base of thermoelectric generators, vibration generators and magnetic induction generators. The investigation of engine vibration characteristics in order to form the «vibration passport» for engine type is described. This passport is to be used for engine diagnostic during exploitation. There is described the method of electronic automatic control systems reliability confirmation by comparison with the prototypes (analogues) which is proposed by scientists of Central Institute of Aviation Motors.

Key words: mathematical model «virtual engine», wireless technologies

Ранченко Геннадий Степанович – канд. техн. наук, главный конструктор АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: annaodessa2007@rambler.ru.

Ranchenko Gennady Stepanovich – Candidate of Technical Science, Chief Designer of JSC «Element», Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.

Buryachenko Anna Grigorevna – Chief Metrology of JSC «Element», Odessa, Ukraine, e-mail: annaodessa55@gmail.com.