



УДК 621.4:62-1/-9:62-97/-98

А. С. Косой, С. В. Монин, М. В. Синкевич

## Современные подходы к исследовательским работам при создании микротурбинных энергетических комплексов

Приведен анализ резервов повышения эффективности газотурбинных двигателей малой мощности. Показано, что газодинамическое совершенствование основных узлов проточной части двигателя оказывает существенное влияние на его коэффициент полезного действия. Предложена новая концепция создания высокоэффективных лопаточных машин на основе современных аддитивных технологий. Приведено описание уникальной экспериментально-исследовательской базы для исследований, поузловой доводки элементов газотурбинных двигателей, которая должна обеспечить их малозатратное и эффективное проектирование.

**Ключевые слова:** турбина, компрессор, газодинамический стенд, газотурбинный двигатель.

Исторически сложилось, что область применения газотурбинных двигателей (ГТД) была ограничена авиацией и корабельными силовыми установками. Причиной явилось то, что по удельным массогабаритным показателям ГТД значительно превосходят поршневые машины. Так, двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют удельный вес 0,54...0,67 кг на 1 кВт, а ГТД – 0,1...0,14 кг на 1 кВт. Относительно термодинамики различие в эффективности этих машин незначительно. Величины КПД ДВС достигли значений 50 %, эффективность современных ГТД в простом цикле уже превысила 40 %, а КПД парогазовых установок превысил 60 %. Последние характеристики не вполне правомерны для двигателей ряда малых мощностей – от единиц до нескольких сотен киловатт. Эффективность таких двигателей значительно ниже. Так, КПД у большинства выпускаемых в мире ГТД простого цикла мощностью до 100 кВт не превышает 11 %, а у ДВС может превышать 34 %. По этой причине применение ГТД малой мощности (ГТДМ) можно считать целесообразным в тех областях, где определяющее значение имеют массогабаритные характеристики или другие специфические свойства этих двигателей, например снижение эксплуатационных затрат вследствие возможного отсутствия маслосистемы. Массогабаритные характеристики, особенности пуска и работы определили широкое применение ГТДМ в качестве вспомогательных силовых установок (ВСУ) в авиации, различных транспортных средствах специально-

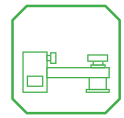
го назначения. Однако использование ГТДМ в локальной энергетике в значительной степени ограничивает большой расход топлива, являющийся производной низкого КПД. Предпринятые попытки модернизации существующих ВСУ с целью повышения КПД обеспечили к началу XXI в. появление на газотурбинном рынке небольших энергетических установок с КПД 29...34 %, приведенных в таблице.

Показатели наиболее широко представленных на российском рынке установок с ГТДМ

Фирма, страна-производитель	Модель ГТДМ	Мощность, кВт	КПД, %
<i>Turbec</i> , Италия	<i>T600</i>	655	23,5
<i>Turbec</i> , Италия	<i>T100</i>	100	30,0
<i>Elliott</i> , США	<i>TA-100</i>	100	29,0
<i>Bowmen</i> , Англия	<i>TG80CG</i>	80	–
<i>IngersollRand</i> , США	<i>IR 250</i>	250	32,0
<i>Capstone</i> , США	<i>C30</i>	30	27,0
<i>Capstone</i> , США	<i>C60</i>	60	29,0
<i>Capstone</i> , США	<i>C200</i>	200	34,0

Увеличение КПД ГТДМ является следствием усложнения цикла ввиду применения рекуперации тепла выхлопных газов. Новые показатели экономичности ГТДМ обеспечили значительный рост продаж энергетических установок с такими двигателями. Так, за последние пять лет фирма *Capstone* (США) поставила в Россию несколько тысяч энергетических установок с ГТД комбинированного цикла мощностью 30, 60 и 200 кВт. Покупатели отдали предпочтение установкам с большим ресурсом, работающим без особого шума, вибрации и, что особенно важно, без использования масла в подшипниках опор ротора турбогенератора и самого ГТД. Можно ожи-

© Косой А. С., Монин С. В., Синкевич М. В., 2018



дать еще больший коммерческий успех таких установок, если их КПД превысит аналогичный показатель установок с ДВС.

Высокоэффективные энергетические установки с ГТДМ широко применяются в системах автономного энергоснабжения (САЭС), а также резервные и аварийные системы. Значительное количество САЭС в России используется для энергоснабжения удаленных, не имеющих централизованного энергообеспечения объектов (связных, радиолокационных станций и т. д.). Большое количество таких объектов обусловлено значительностью территории России, включающей труднодоступные места Арктики и Крайнего Севера. Климатические условия их эксплуатации определяют преимущества применения ГТДМ в САЭС.

Ввиду сказанного выше стоит отметить наличие в России большого спроса на высокоэффективные газотурбинные САЭС. С целью ликвидации дефицита таких САЭС в 2016 г. на одном из ведущих производителей радиолокационных станций (РЛС) и радиолокационных комплексов (РЛК) Научно-производственном объединении «Лианозовский электромеханический завод» (НПО «ЛЭМЗ») начались работы по созданию высокоэффективного ГТДМ. При участии специалистов Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН) создан научно-производственный центр «САЭС» (НПЦ «САЭС»), которому была поручена разработка таких двигателей. За короткое время в НПЦ «САЭС» была разработана документация на ГТД мощностью 30 кВт. Технические характеристики предполагаемых к выпуску отечественных машин закладывались в проект заметно выше, чем у зарубежных прототипов (см. таблицу).

Оправданно ли это и каковы объективные возможности повышения эффективности ГТДМ? На основе имеющегося опыта и данных современных газотермодинамических исследований можно заключить, что вероятность достижения поставленной цели довольно высока.

Стратегическим направлением в решении задачи повышения топливной экономичности для ГТД большой мощности является повышение температуры цикла. Однако в от-

личие от ГТД большой мощности с развитыми системами охлаждения в ГТДМ, особенно регенеративных, при отсутствии прорывных решений по жаростойким и жаропрочным материалам повышение температуры цикла малоэффективно. Определенные возможности повышения топливной экономичности, особенно КПД на частичных нагрузках, связаны с совершенствованием схемных решений и оптимизацией термодинамического цикла [1, 2].

Анализ резервов повышения эффективности ГТДМ показывает, что наиболее существенное влияние на КПД оказывает газодинамическое совершенствование основных узлов проточной части – гидравлического сопротивления патрубков и эффективности лопаточных машин (компрессора и турбины). В современных регенеративных ГТД из-за больших гидравлических потерь в патрубках и несовершенства процессов сжатия и расширения теряется до трети КПД. Так, политропический КПД процесса сжатия в реальных ГТДМ составляет около 82 % [3], что приводит к снижению КПД их реального цикла относительно идеального на 15...20 %. Политропический КПД процесса расширения находится на уровне 83,5 % [3], что дополнительно снижает КПД машин на 15...20 % (также относительно идеального цикла). Гидравлические сопротивления в тракте ГТДМ приводят к фатальному падению КПД в зоне малых удельных мощностей (где степень повышения давления меньше 2), а в области максимальной удельной мощности к снижению на 15...20 % [4].

Высокая эффективность во вновь создаваемых ГТД может быть реализована путем применения современных методик проектирования с использованием средств вычислительной гидродинамики (англ. *Computational fluid dynamics, CFD*). Современные достижения во многих областях высоких технологий открывают новые горизонты для исследовательской и инженерной работы. Есть основания полагать, что существенная доля обозначенного здесь резерва повышения экономичности в новом ГТДМ будет реализована.

Разработки в НПЦ «САЭС» служат свидетельством того, что минимизация гидравлических потерь по результатам 3D газодина-



мических расчетов при оптимизации камеры сгорания, регенератора и особенно соединительных каналов в общей компоновке ГТДМ могут обеспечить рост КПД ГТДМ в целом как минимум на 5...6 % (относительных). Согласно полученным показателям и имеющимся резервам, с учетом повышения степени регенерации на 5...6 % можно ожидать, что КПД нового поколения ГТДМ по пессимистической оценке составит 37 %, а по оптимистической – 42 %. Эти цифры существенно превышают индекс эффективности ГТДМ, представленных на современном рынке (см. таблицу) и превосходят или, по крайней мере, не уступают показателям лучших газопоршневых машин. При таких характеристиках с учетом более высокого уровня надежности и при увеличенных сроках необслуживаемой эксплуатации ГТДМ могут занять лидирующую позицию в автономной и распределенной энергетике, особенно в арктических условиях. И даже в районах с централизованным энергоснабжением, учитывая потери энергии при транспортировке на большие расстояния, энергетические установки с новыми высокоэффективными ГТДМ во многих случаях могут оказаться вполне конкурентоспособными.

За 2017 г. в НПЦ «САЭС» был разработан высокоэффективный ГТДМ и выполнен ряд обеспечительных технологических мероприятий. Разработаны новые технологические приемы, обеспечивающие проектирование, изготовление и испытания определяющих узлов ГТДМ. Так, стенды центра позволяют проводить исследовательские и доводочные работы как на ГТДМ, так и на отдельных его узлах: камере сгорания, рекуператоре (теплообменнике), подшипниках, топливной аппаратуре, патрубках и лопаточных машинах. Введен в строй стенд для испытаний газотурбинных САЭС малой мощности. Стенд обеспечивает проведение предварительных и приемочных испытаний САЭС, а также предназначен для проведения комплексных исследовательских работ на агрегатах двигателя и САЭС в целом, в том числе на системах преобразования электроэнергии и автоматического регулирования. Стенд и вспомогательные системы оснащены современным комплексом измерений, позволя-

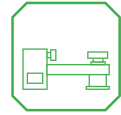
ющим с высокой точностью осуществлять замеры широкого спектра требуемых параметров (температур, давлений, расходов, мощностей, частот, химических составляющих, электрических и магнитных полей).

САЭС может работать на жидком или газообразном топливе. Вырабатываемая электроэнергия отдается в общую сеть либо тратится на регулируемые активные нагрузки. Стенд оснащен мобильной системой сбора и обработки информации (ССОИ), используя которую можно оперативно в соответствии с программой испытаний менять карту замеров, а также в случае необходимости использовать ССОИ на других испытательных и исследовательских стендах. ССОИ позволяет задействовать одновременно не менее 150 измерительных каналов. Предусмотрена возможность развития ССОИ в части наращивания номенклатуры и количества измерительных и управляющих каналов.

Используя метод *CFD* в проектировании, можно создавать более эффективные компрессоры и турбины. Однако сложность газодинамических процессов в лопаточных машинах при их проектировании не позволяет полагаться только на расчетные данные. Результаты расчетов необходимо верифицировать с результатами физических экспериментов на материальных объектах – макетах и опытных образцах разрабатываемых изделий. Работа с материальными объектами дает наибольшую достоверность в сравнении с расчетными исследованиями на виртуальных моделях.

Однако изготовление технического оборудования для таких работ – материально энергозатратный процесс. Конфигурация исследуемых деталей лопаточных машин сложна. В их серийном производстве используется дорогостоящая оснастка для обеспечения необходимого качества изготовления. В случае когда требуется несколько опытных образцов, использовать оснастку экономически нецелесообразно. А без нее качество продукта снижается, сроки изготовления и себестоимость существенно увеличиваются.

Описанная проблема инициировала новое технологическое направление, получившее название «быстрое прототипирование»,



в котором наиболее широко применяются аддитивные технологии. В настоящее время появилось большое количество 3D-принтеров, использующих широкий спектр материалов и имеющих различные принципы действия и большой стоимостной диапазон от так называемых бытовых до уникальных комплексов вырабатывания крупногабаритных жаропрочных деталей. Теперь 3D-принтеры рассматриваются как составная часть основного технологического процесса изготовления товарной продукции в технологиях ремонта ответственных изделий, например лопаток газовых турбин. Однако изготовление деталей из металлических материалов на 3D-принтерах – дорогостоящий процесс. Печатать детали из пластмасс существенно дешевле, но их прочность сильно уступает деталям, напечатанным из металла.

С учетом этих аспектов при активизации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), направленных на совершенствование малоразмерных лопаточных машин, был разработан метод организации экспериментальных работ, позволяющий кардинально сократить сроки их проведения. Предпосылками к разработке нового метода стали возможности аддитивных технологий. Этот метод предназначен в первую очередь для изготовления пластмассовых макетов и обеспечивает достаточность имеющихся прочностных характеристик за счет формирования соответствующих условий работы в экспериментах.

Для создания таких условий испытаний ОИВТ РАН совместно с НПО «ЛЭМЗ» был разработан уникальный газодинамический стенд. При его создании были установлены основные технические требования:

- соответствие натуральных геометрических размеров испытываемого объекта или его полное геометрическое подобие с небольшими коэффициентами масштабирования;
- обеспечение подобия объекта по критериям Маха и Рейнольдса;
- наличие возможности испытывать пластмассовые макеты.

Создание такого газодинамического стенда позволило обеспечить реализацию новой технологии исследования лопаточных машин.

Эта технология включает испытания лопаточных машин в виде макетов, которые можно изготовить быстро из недорогих материалов. При этом учитываются следующие факторы.

При повышении температуры макета выше 100 °С пластмассы резко снижают свои прочностные свойства. По этой причине температуры на новом стенде должны быть смоделированы так, чтобы ни на каких испытываемых режимах температура газового потока не превышала 100 °С. Предел прочности доступных пластмасс в 10–20 раз ниже предела прочности используемых в ГТД сплавов (меньшее значение относится к легким сплавам, а большее – к высокопрочным). Для лопаточных машин характерно, что наиболее нагруженными являются роторные детали, а главным фактором, вызывающим механические напряжения, – центробежные силы. Напряжения от центробежных сил, как известно, пропорциональны плотности материала и квадрату частоты вращения. Плотность пластмассы почти в 3 раза меньше плотности легких сплавов и в 8 раз меньше плотности высокопрочных сталей, поэтому для сохранения запасов прочности в модельных условиях необходимо понизить частоту вращения приблизительно в 2 раза соответственно. Если при этом соблюдено геометрическое подобие, в 2 раза уменьшатся все скорости. Известно, что в критерий Маха входят скорость в первой степени и температура в степени 0,5. Таким образом, при уменьшении частоты вращения в 2 раза обеспечить сохранение критерия Маха можно за счет снижения температуры в 4 раза. Критерий Рейнольдса также включает скорость в первой степени. Для его сохранения уменьшение скорости можно компенсировать за счет снижения давления [5].

На основе теоретических и практических предпосылок, приведенных выше, был создан стенд для газодинамических исследований на материальных макетах разрабатываемых малоразмерных лопаточных машин из пластмассы (рис. 1).

На стенде можно испытывать макеты турбомашин натуральных геометрических размеров. При этом допускается исследовать компрессоры с приведенным расходом до 1 кг/с,



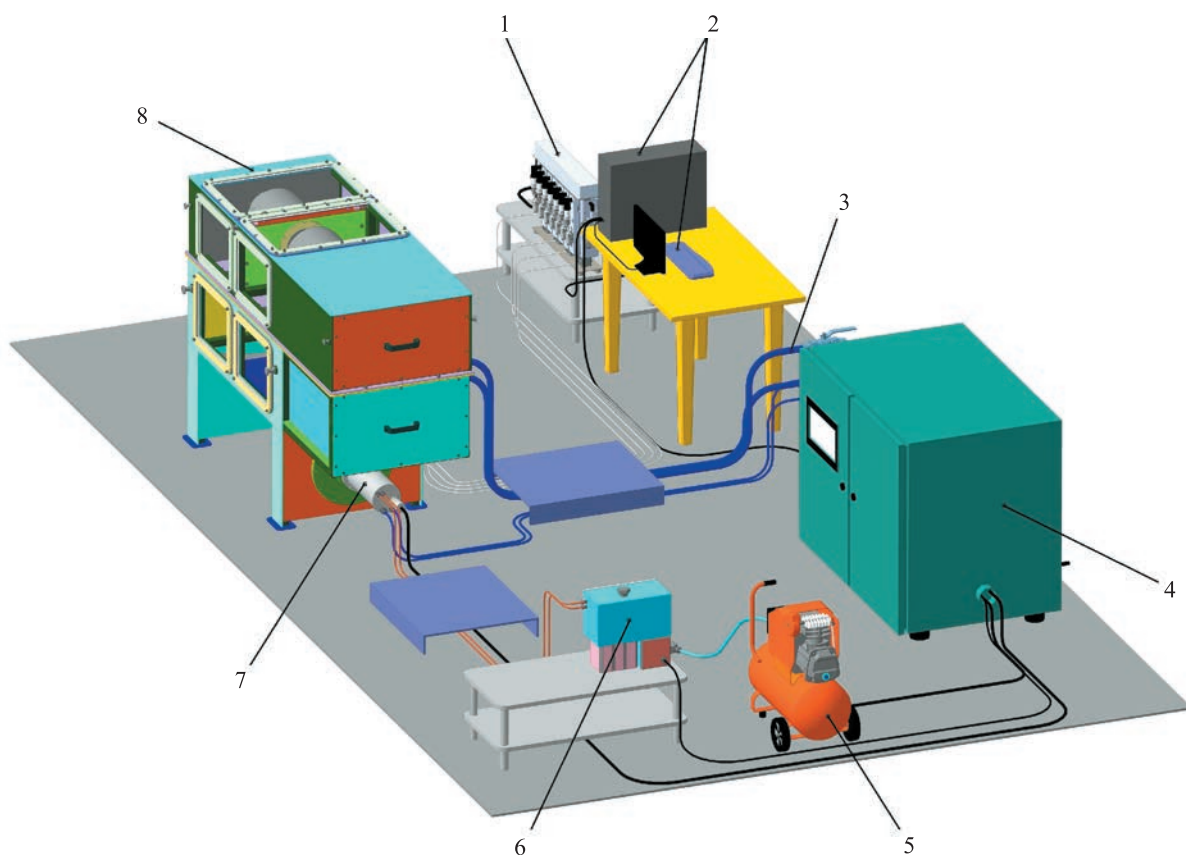


Рис. 1. Общий вид газодинамического стенда:

- 1 – контейнер датчиков преобразователей давления; 2 – компьютер для обработки результатов испытаний; 3 – система подачи технической воды; 4 – шкаф управления электроприводом; 5 – компрессор; 6 – распределитель маслотовоздушный; 7 – компрессор вакуумирующий; 8 – испытательный бокс

а также турбины с расходным комплексом  $\bar{G} = 0,4 \text{ (кг/с} \cdot \sqrt{\text{К}})/\text{кПа}$ , который определяется по формуле

$$\bar{G} = (G\sqrt{T}) / P,$$

где  $G$  – расход;

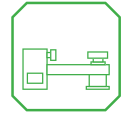
$T$  – температура на входе в турбину;

$P$  – давление на входе в турбину.

При этом необходимо обеспечить возможность использовать макеты натуральных геометрических размеров. Ключевые элементы стенда – вакуумирующая и охлаждающая системы, создающие необходимые условия моделирования. Вакуумирующая система обеспечивает энергией исследуемые газодинамические процессы стенда. Ее характеристики выбраны таким образом, чтобы обеспечивать возможность проведения испытаний макетов компрессоров и турбин с сохранением геометрической идентичности при номинальном расходе рабочего тела до 1 кг/с и степени повышения давления до 7,5 или его пониже-

ния до 7. Охлаждающая система обеспечивает температуру рабочего тела (воздуха) стенда в криогенных пределах (80...90 К). Для этого используется жидкий азот. Система утилизации холода позволяет проводить исследование в течение часа, расход жидкого азота при этом составляет 40 л/ч.

Воздух газодинамического стенда необходимо охлаждать до криогенных температур. В связи с этим возникла проблема, связанная с наличием в воздухе компонент, конденсирующихся при крайне низких температурах (например, водяной пар, углекислый газ и др.). Конденсация этих компонент чревата двумя негативными последствиями. Во-первых, в этом случае переход происходит в твердую фазу, следовательно, твердая фаза будет накапливаться и со временем перекрывать каналы. Во-вторых, фазовые переходы в исследуемых газодинамических процессах могут исказить результаты исследования. Для того чтобы влияние фазовых переходов было пренебрежимо



мало, наличие конденсирующихся компонент должно измеряться миллионными долями. Для обеспечения приемлемой концентрации конденсирующихся компонент рабочее тело в газодинамическом стенде проходит предварительную подготовку по осушке. На данном этапе используются закольцованная система перекачки воздуха с полной изоляцией от окружающей среды и система полузакрытая, где массообмен с окружающей средой сведен к минимуму.

Основная концепция стенда – это максимальное сокращение сроков подготовки испытаний. На этапе подготовки испытаний помимо объекта исследования необходимо изготовить оборудование, согласовывающее этот объект со стационарным стендовым оборудованием (рамой, трансмиссией, приводом, нагрузочным устройством). Изготовление этой материальной части может быть не менее длительным и трудоемким, чем изготовление самого объекта исследования, поэтому значительная часть стендового оборудования изготавливается методами быстрого прототипирования. С этой целью стационарное стендовое оборудование по механической части полностью отсоединено от объекта исследования. Все энергетические потоки от стационарного оборудования к объекту исследования передаются через газодинамические связи и технологические компоненты, изготовленные так же, как исследуемый объект.

Для изготовления макетов из пластика в НПЦ «САЭС» был собран 3D-принтер. Наличие уникального газодинамического стенда обеспечивало достоверность полученных результатов испытаний пластмассовых макетов во всем требуемом диапазоне работы натуральных объектов в создаваемом ГТДМ.

Отметим, что еще одним важнейшим преимуществом пластмассовых макетов является возможность применять прозрачную пластмассу, что позволяет визуализировать поток и наблюдать особенности течения. Для реализации визуализации экспериментов в испытательном боксе газодинамического стенда есть смотровые окна и предусмотрена установка видеокamera для сверхскоростной видеосъемки.

При создании стенда большое внимание было уделено ССОИ. Были спроектированы

и изготовлены специальные мобильные контейнеры, в которых датчики-преобразователи первичных сигналов собраны по схожим функциональным группам (рис. 2).

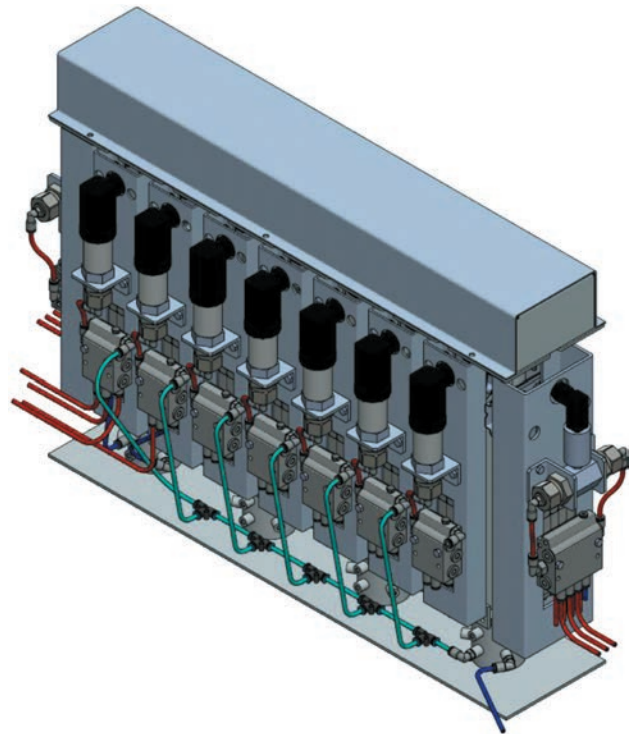


Рис. 2. Контейнер датчиков-преобразователей давления

В одном контейнере датчиков-преобразователей давления располагается до 16 легко-съемных модулей, каждый из которых содержит датчик-преобразователь и пневматический переключатель. Пневматические переключатели имеют четыре положения. Каждый датчик-преобразователь в процессе испытаний может быть переключен на одну из трех импульсных трасс, подведенных к модулю или на ресивер с тестовым давлением. Таким образом обслуживается в 3 раза больше измерительных каналов по сравнению с числом датчиков-преобразователей. Тестирование измерительных каналов можно проводить непосредственно в процессе испытаний. Переключения выполняются по команде оператора или автоматически по заложенной программе испытаний.

Составной частью контейнера являются также четыре ресивера, первый из которых пополняется сжатым воздухом от внешнего источника. Этот воздух используется в системе управления пневматическими переключателями и для создания трех регулируемых диапазо-



нов тестового давления в трех оставшихся ресиверах. Тестовые давления задаются оператором или автоматически в соответствии с программой испытаний. Для обеспечения заданных тестовых давлений есть три регулятора давления, по одному на каждый регулируемый ресивер.

В рассматриваемой НИОКР для построения ССОИ используется программируемый контроллер автоматизации, представляющий собой многофункциональную систему управления и сбора данных. Данная система разработана для задач, требующих высокой производительности и надежности проводимых измерений. В состав системы входят:

- контроллер с операционной системой реального времени (*Linux Real-Time*);
- программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) (параллельная обработка данных на частоте до 40 МГц);
- комплект модулей ввода/вывода сигналов;
- панель с портами для подключения VGA, HMI;
- корпус с системой электропитания.

Контроллер реального времени обеспечивает детерминированное во времени исполнение программного кода, что позволяет решать задачи комплексной обработки и анализа собираемой информации.

ССОИ выполняет функции не только сбора и обработки информации, но и управления исполнительными механизмами. Так, в приведенном примере контейнера датчиков-преобразователей давления система осуществляет управление регуляторами давления и пневматическими переключателями. Кроме этого, в концепцию стенда заложена возможность исследования полей температур и давлений, а также визуализация течений потоков газа. Управление приводами системы траверсирования потока газа и камерами наблюдения замыкается на ССОИ. Гибкая структура ССОИ позволяет в кратчайшие сроки решать вновь возникающие проектно-исследовательские задачи.

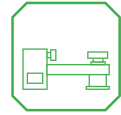
В настоящей статье не рассмотрены вопросы повышения КПД ГТДМ при использовании эффективного рекуператора, создания экономических опор скольжения роторов, камеры сгорания, топливной системы, систем вос-

пламенения, для успешной реализации которых в НПЦ «САЭС» разработаны соответствующие стенды. Отметим, что в НПЦ «САЭС» создается уникальная экспериментально-исследовательская база для исследований, поузловой доводки и испытаний элементов газотурбинных модулей малой мощности, которая должна обеспечить их малозатратное и эффективное проектирование. Создание такой базы стало возможным благодаря консолидации усилий НПО «ЛЭМЗ» и ОИВТ РАН. В то же время привлечение к участию в экспериментах ученых, аспирантов и студентов учебных институтов (НИУ «МЭИ», РУДН и МГТУ им. Н. Э. Баумана) создает благоприятные условия для дальнейшего инновационного развития работ и обеспечивает активное участие в подготовке высококвалифицированных кадров высоких газотурбинных технологий.

### Список литературы

1. *Беляев В. Е., Бесчастных В. Н., Евдокимов В. Д., Синкевич М. В.* Концепция создания и перспективы применения семейства ГТД регенеративного цикла в горно-транспортной технике // Горная промышленность. 2008. № 3. С. 76–79.
2. *Trotter F.* ICR350TM Microturbine. The diesel engine alternative // Microturbine Search Engine Series. ICR Turbine Engine Corporation. September 5, 2018. URL: <http://www.globalmicroturbine.com/search/capstone/pages/icr350-microturbine-diesel-engine-alternative-001.htm> (access 25.12.2017).
3. *Kesseli J., Wolf T., Nash J., Freedman S.* Micro, industrial, and advanced gas turbines employing recuperators // Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, International Power Generation Conference, June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA. Vol. 3. Paper no. GT2003-38938. Pp. 789–794.
4. *Косой А. С., Попель О. С., Бесчастных В. Н., Зейгарник Ю. А., Синкевич М. В.* Газотурбинные установки малой мощности в энергетике: пути повышения эффективности и масштабов внедрения // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 25–32.
5. Способ испытаний малоразмерных лопаточных турбомашин и испытательный стенд для его реализации / *Монин С. В., Синкевич Е. М., Синкевич М. В., Косой А. А., Косой А. С.* Пат. RU № 2634341, МПК G01M 15/14 (2006.01). Оpubл. 25.10.2017. Бюл. № 30. 2 с.

Поступила 30.11.17



**Косой Александр Семенович** – доктор технических наук, профессор, директор Научно-производственного центра «Системы автономного электроснабжения» Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод», г. Москва.

Область научных интересов: газотурбинные технологии, горение в потоке.

**Монин Сергей Викторович** – начальник отдела Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод», г. Москва.

Область научных интересов: системы первичного и вторичного электропитания радиолокационных систем и комплексов.

**Синкевич Михаил Всеволодович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», г. Москва.

Область научных интересов: газотурбинные технологии, газотермодинамика.

## Contemporary approaches to research supporting the development of microturbine power generation systems

The paper provides an analysis of how much it is possible to improve the efficiency of low-power gas-turbine engines. We show that refining those features of the main blading section units that affect the gas dynamics significantly enhances engine performance. We present a new concept of developing highly efficient turbomachinery, pumps and propellers using modern additive manufacturing technology. We describe a unique research and testing facility for studies, per-node refinement and testing concerning gas-turbine engine components, which should ensure low cost and high efficiency of gas-turbine engine design.

*Keywords:* turbine, compressor, gas-dynamic test bench, gas-turbine engine.

**Kosoy Aleksandr Semenovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of “Autonomous Power Supply Systems” Research and Production Centre, Joint-Stock Company “Lianozovo Electromechanical Plant Research and Production Corporation”, Moscow.

Science research interests: gas-turbine engineering, combustion in flows.

**Monin Sergey Viktorovich** – Head of Department, Joint-Stock Company “Lianozovo Electromechanical Plant Research and Production Corporation”, Moscow.

Science research interests: power plants and converter-based power supply systems for radiolocation systems and complexes.

**Sinkevich Mikhail Vsevolodovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

Science research interests: gas-turbine engineering, gas thermodynamics.