

Инновационные вычислительные технологии разработки и доводки перспективных двигателей маневренной авиации следующего поколения

В мировой и отечественной практике на современном этапе развития двигателестроения для целей разработки и доводки двигателей (особенно применительно к высокоскоростным самолетам) осуществляется всестороннее внедрение инновационных вычислительных технологий. Инновационные цифровые технологии являются мощным вычислительным инструментарием, позволяющим оперативно находить новые стратегические направления развития разработок двигателей нового поколения, например такие, как системный анализ, многокритериальная оптимизация и иерархичность моделирования элементов двигателя и его систем. Это позволяет снизить сроки и стоимость разработок, а также находить инновационные технические решения, позволяющие определить прорывные магистральные направления развития двигателестроения.

Цифровые технологии разработки и доводки двигателей

В ОКБ им. А. Люльки при разработке двигателя 4-го поколения АЛ-31 имелась возможность использования лишь одномерной математической модели компрессора. Это значительно снижало достоверность и значимость данного вычислительного инструмента и фактически вынуждало использовать метод экспериментирования. Для разработки двигателей 5-го и последующих поколений такой подход является явно неприемлемым и существенно повышает технический риск невыполнения требований ТЗ в полной мере. При

разработке компрессора для двигателя 5-го поколения использование всего спектра вычислительных технологий аэродинамического анализа (1D, 2D и 3D) позволило в рамках уже первой поставки обеспечить требования ТЗ. Следует отметить, что при разработке как КНД, так и КВД для определения путей обеспечения максимально высокой эффективности использовалась технология численной оптимизации IOSO, которая нашла широкое признание в мировом техническом сообществе. В частности, при разработке вентилятора двигателя АЛ-55И впервые в мире была решена задача оптимизации геометрии венцов трехступенчатого вентилятора при использовании трехмерного численного моделирования на основе программного продукта NUMECA.

На современном этапе в ОКБ им. А. Люльки за магистральное направление разработки и доводки современного двигателя для скоростного маневренного самолета 5-го и последующего поколения взято создание и внедрение в технологический процесс компонента инновационной вычислительной технологии, названного "Виртуальный стенд". Инновационные цифровые технологии базируются на комплексе современных стратегий системного анализа сложного технического объекта. Их базовыми компонентами в частности являются:

- ▶ многоуровневое моделирование элементов и адаптивное переключение уровней анализа объекта и его элементов;
- ▶ векторная идентификация объекта и его элементов;

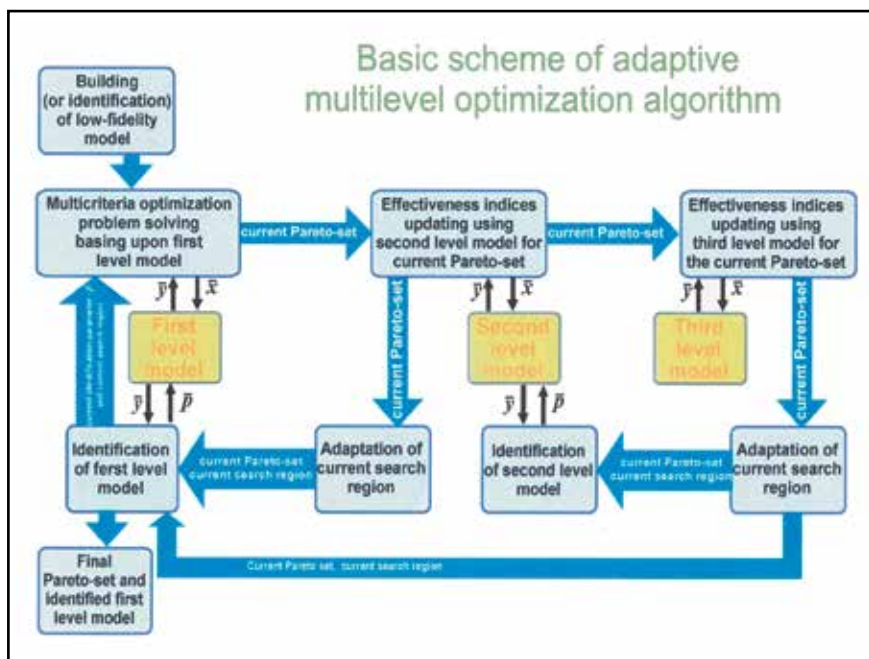


Рис. 1. Инновационная многоуровневая численная технология анализа и оптимизации элементов и в целом ГТД различного назначения

- ▶ вероятностная оценка реализуемости технического решения (Robust Design Optimization, RDO);
- ▶ использование гибридной структуры анализа и моделирования объекта и его элементов с учетом возможностей адекватного математического моделирования трудно формализуемых физических процессов объекта и его элементов;
- ▶ комплексный анализ перспективности технического решения по критериям высокого уровня с учетом структуры объекта и особенностей его функционирования как системы более высокого уровня, то есть рассмотрение двигателя в системе самолета.

Многоуровневое моделирование элементов и адаптивное переключение уровней анализа объекта и его элементов

Многоуровневое моделирование позволяет значительно сократить время, которое необходимо для поиска вариантов, обеспечивающих предельно достижимую эффективность двигателя по одному либо по совокупности критериев эффективности. При этом двигатель рассматривается как сложный наукоемкий технический объект (рис. 1).

К явным преимуществам данной вычислительной технологии можно отнести возможность адаптивного переключения с одного на другой уровень анализа и оптимизации элементов и в целом двигателя. Как показал практический опыт, накопленный в ОКБ им. А. Люльки, применение данной концепции позволяет значительно (на несколько порядков) снизить время, требуемое для анализа и, главное, поиска оптимального варианта рассматриваемого объекта.

В качестве одного из примеров на рис. 2 показан вариант многокритериальной оптимизации четырехступенчатого вентилятора современного двигателя при

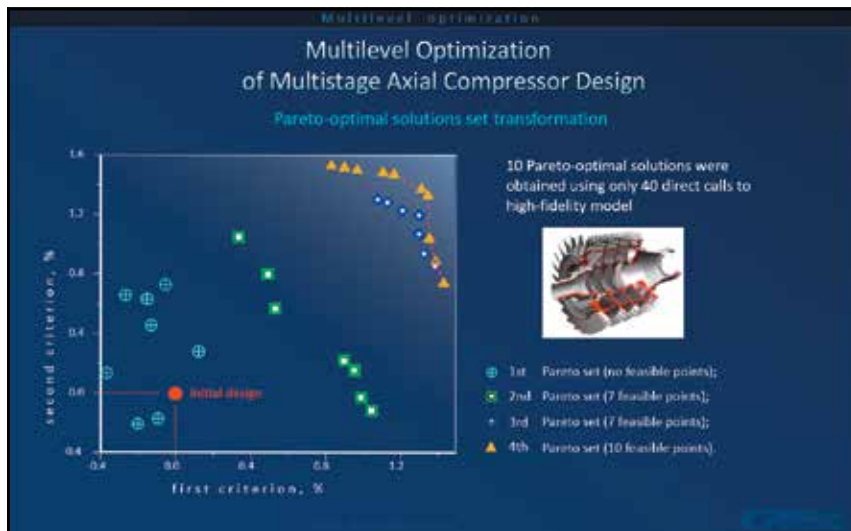


Рис. 2. Результаты решения задачи. Множество Парето найдено при использовании одной из компонент инновационной многоуровневой численной технологии

адаптивном использовании 2D- и квази-3D- вычислительных технологий аэродинамического анализа лопаточной машины. Суть данного многоуровневого подхода для этого частного примера заключается в том, что для определения текущего множества Парето (компромисс между КПД на расчетном и крейсерском режимах работы) используется "быстрая" 2D- математическая модель компрессора, а квази-3D-модель используется лишь для анализа вариантов геометрии вентилятора, которые формируют Парето-множество (множество неулучшаемых проектов компрессора одновременно по двум критериям). Следует отметить, что каждой точке в Парето-мноестве соответствует своя собственная геометрия лопаточных венцов. Далее осуществляется процедура текущей идентификации 2D- аэродинамической модели компрессора в более узкой области по варьируемым параметрам (геометрии лопаточных венцов), которая соответствует текущей области Парето-мноества. Данная процедура итеративно повторяется. В частности, для описываемой задачи решение было получено при выполнении четырех итерационных процедур. В результате было получено искомое Парето-множество. Решение данной задачи потребовало вычисления всего лишь 40 альтернативных вариантов геометрии вентилятора в квази-3D-постановке. Таким образом, для нахождения компромис-

са по КПД на расчетном и крейсерском режимах потребовалось меньшее количество вычислений по квази-3D- аэродинамической модели, чем размерность задачи оптимизации.

Естественно, возможно рассмотрение в качестве одного из уровней моделирования объекта также и непосредственно экспериментальных исследований. Однако следует отметить, что с практической точки зрения это применимо лишь для определенного класса задач. В качестве примера может служить случай, когда требуется определить оптимальные законы управления объектом (то есть геометрия объекта не изменяется, а меняются лишь законы управления им).

Векторная идентификация объекта и его элементов

Очевидно, что использование инновационной многоуровневой численной технологии анализа и оптимизации элементов и в целом ПТД предполагает, во-первых, проведение достоверного анализа объекта на всех уровнях (включая 3D-моделирование), а во-вторых, обеспечение близкого уровня достоверности моделирования для моделей различного уровня (то есть математические модели различного уровня должны давать близкое по точности описание физических процессов и явлений, протекающих

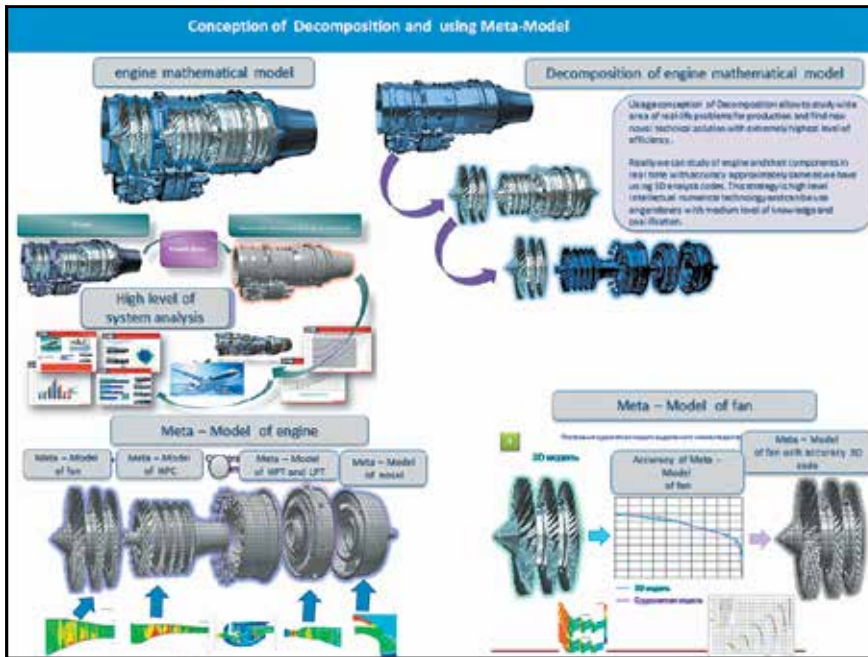


Рис. 3. Пример использования концепции мета-моделей применительно к элементам и двигателю в целом

в элементах двигателя). Это необходимо для обеспечения возможности адаптивного переключения с одного уровня моделирования на другой без потери достоверности анализа объекта. Следует отметить, что целесообразность и эффективность использования инновационной численной концепции “Виртуальный стенд” всецело зависит от достоверности численных моделей всех уровней, включая самый высокий – 3D-моделирование.

Как показала практика, не всегда удается обеспечить требуемую адекватность вычислительных технологий, используя только весь набор задаваемых параметров численных технологий анализа объекта (изменение сетки, выбор различных типов и параметров турбулентности и т.д.). В таких случаях целесообразно применять вычислительный инструментарий, позволяющий формализовать процедуру обеспечения адекватности численной технологии. Мощным средством для решения данной проблемы является вычислительная процедура идентификации. Поэтому данная компонента выступает составной частью технологии “Виртуальный стенд”.

Другим не менее перспективным направлением развития рассматриваемой технологии является применение концепции так называемых мета-моделей, или суррогатных

моделей элементов и двигателя в целом. Такие модели могут быть разработаны при применении целого ряда различных подходов – от использования тривиальных технологий, реализующих ту или иную концепцию аппроксимационных технологий, до использования упрощенных физических моделей, которые описывают в какой-то степени физику протекающих в двигателе явлений и процессов с разной степенью упрощения (например, без учета концевых эффектов). Целесообразность использования данных моделей диктуется необходимостью уменьшения времени, затрачиваемого на анализ,

исследование и оптимизацию того или иного варианта модификации объекта. Как и в случае применения идентификации моделей более низкого уровня анализа, для суррогатных моделей применяется технология идентификации, представленная на рис. 3.

Еще одним достаточно интересным и перспективным направлением углубленного исследования элементов двигателя является рассмотрение динамических и нестационарных процессов, протекающих в элементах и в самом двигателе. Углубленное исследование данных явлений и процессов может обеспечить весьма неожиданный потенциал для повышения эффективности двигателей. Например, при моделировании двухконтурного двигателя достаточно упрощенно рассматривается разделитель потока ТРДД. Однако более детальное исследование неравномерности и процессов нестационарности может оказать существенное влияние на концепцию анализа данного элемента в системе других элементов двигателя и помочь определить возможные пути совершенствования объекта.

Помимо вышесказанного, дополнительные резервы совершенствования двигателей заложены на двух ключевых направлениях. Первое из них – использование многорежимности двигателя, второе – привлечение большего числа дисциплин для анализа объекта (многофункциональная многодис-

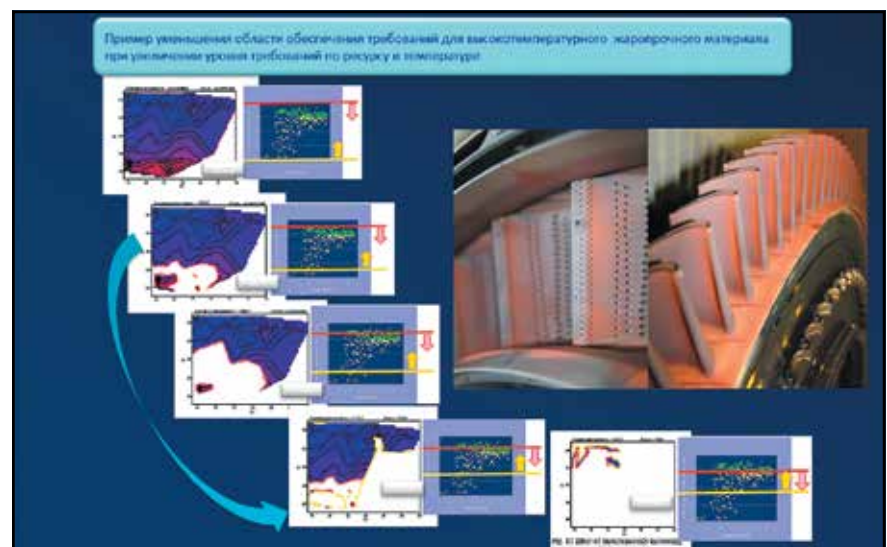


Рис. 4. Многодисциплинарный анализ и многокритериальная оптимизация элементов турбины двигателя, где в качестве одной из компонент анализа присутствует численное моделирование свойств жаропрочного материала

циплинарность). Многорежимность предполагает системность подхода и иерархичность анализа объекта. При системном подходе можно обеспечить максимально достижимую эффективность всей системы сжатия. Отдельное решение задачи оптимизации применительно к каждому каскаду изолировано от совместного анализа результатов, и включение их в единую систему не позволит достичь максимально возможного эффекта, который можно получить, одновременно оптимизируя всю систему сжатия. Это наглядно подтверждается фактом отличия эпюры на входе в каждый каскад компрессоров до и после оптимизации, то есть максимально достижимый эффект обеспечивается не только оптимальным согласованием ступеней в рамках отдельного каскада, но и путем оптимального согласования самих каскадов, рассматриваемых как единая система.

Реализация системного иерархического анализа, в котором двигатель рассматривается как элемент сложной структуры (в системе самолета), то есть на более высоком уровне системности, обеспечивает оптимальное согласование отдельных элементов в системе двигателя.

Далее это направление может существенно расширяться и может предполагать уже как рассмотрение других систем самолета, например топливной и т.п., так и собственно функционирование двигателя и самолета как единой технической системы, которая выполняет определенные функции.

Численная компонента многодисциплинарного анализа и оптимизации имеет практически неограниченные перспективы развития. Это относится как к расширению возможностей различных дисциплин анализа элементов и двигателя в целом, так и к наращиванию информационного потенциала путем привлечения к анализу элементов других дисциплин (рис. 4), а также к совершенствованию производства и эксплуатации всей авиационной техники.

Важное место в инновационной численной технологии занимает собственно технология опти-

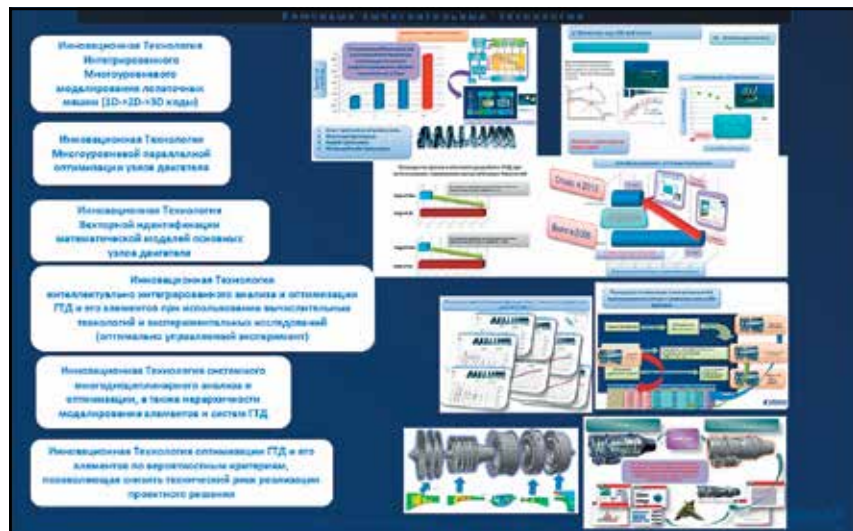


Рис. 5. Ключевые вычислительные инструментари инновационной цифровой технологии ОКБ им. А. Люльки

мизации. В ОКБ им. А. Люльки численная оптимизация выполняется с помощью широко известной в мире технологии оптимизации IOSO. Как известно, данная технология позволяет решать задачи многомерной, многокритериальной, многодисциплинарной оптимизации, то есть фактически закрывает весь спектр потребностей предлагаемой инновационной численной технологии.

В настоящее время проводятся работы по разработке алгоритмов оптимизации IOSO нового поколения, которые позволят успешно решать задачи с тысячами переменных при практическом отсутствии ограничений по распараллеливанию процесса оптимизации, который будет совершенно не связан с размерностью задачи, что имеет место, например, в генетических и градиентных алгоритмах оптимизации.

Таким образом, ключевыми технологиями инновационной численной технологии являются шесть основных вычислительных инструментариев, представленных на рис. 5.

Вероятностные оценки реализуемости технического решения (Robust Design Optimization- RDO)

В ОКБ А. Люльки на протяжении ряда лет широко используется вычислительная технология анализа и оптимизации по вероятностным критериям. В частности, при

разработке двигателей 5-го поколения использовались элементы оптимизации объекта по вероятностным критериям (рис. 6). Анализ представленных на рис. 6 результатов показывает, что решения, найденные по вероятностным критериям, в силу того, что они находятся в других областях технических решений, значительно отличаются от тех, которые были найдены при традиционно используемом детерминированном подходе.

Использование гибридной структуры анализа и моделирования объекта и его элементов

В ОКБ А. Люльки разработана технология, которая позволяет реализовать гибридный вычислительный процесс, если анализируется элемент двигателя, который трудно формализуем для адекватного численного моделирования. Одним из таких элементов является камера сгорания. В частности, среди специалистов GE результат считается достаточно успешным, если моделирование такого сложного объекта, как камера сгорания двигателя (который характеризуется многофазностью протекания процессов горения, распылением топлива, разного уровня химическими реакциями разложения топлива на компоненты и т.д.) осуществляется с точностью 50%.



Рис. 6. Многокритериальная многодисциплинарная оптимизация элементов и в целом двигателя по вероятностным критериям (технология оптимизации IOSO RM)

Структура инструментария гибридного моделирования позволяет интегрировать процесс моделирования лопаточных машин в трехмерной постановке и экспериментальные исследования камеры сгорания

непосредственно на стенде. Вычислительная модель КВД в трехмерной постановке выдает эпюру давления и температуры на выходе из компрессора, которые преобразуются в аналоговый сигнал и реализуются

на экспериментальном стенде ОКБ им. А. Льюльки. После проведения экспериментальных исследований на выходе камеры сгорания определяются поля давлений и температур, которые после преобразования аналогового вида в числовой передаются в трехмерную модель ТВД. В целом данная процедура позволяет определять характеристики газогенератора в реальном масштабе времени, что далее дает возможность определять интегральные характеристики двигателя и в конечном счете оценивать эффективность двигателя в системе самолета.

На рис. 7 показан пример гибридного стенда двигателя в целом, который реализует предлагаемую вычислительную концепцию гибридного моделирования.

Комплексный анализ перспективности технического решения по критериям высокого уровня

Инновационная численная концепция "Виртуальный стенд" является базовым инструментарием для создания цифровых двойников двигателя на всех этапах жизненного цикла двигателя и его систем – этапе разработки; доводки; производства; формирования электронного паспорта двигателя как технической системы, включающей индивидуальные особенности объекта (имеющиеся отклонения при его производстве, специфику формирования системы дорегулирования двигателя для соответствия требованиям ТЗ, регистрацию фактического расхода ресурса при эксплуатации, особенности сервисного обслуживания объекта и т.д.); этапе утилизации объекта и др.

Заключение

В статье были рассмотрены применяющиеся в ОКБ им. А. Льюльки при разработке перспективных двигателей новых поколений инновационные вычислительные технологии, базирующиеся на комплексе современных стратегий системного анализа сложного технического

объекта, такие как: многоуровневое моделирование элементов и адаптивное переключение уровней анализа объекта и его элементов; векторная идентификация объекта и его элементов; многодисциплинарный анализ и многокритериальная оптимизация объекта и его элементов; вероятностные оценки реализуемости технического решения (Robust Design Optimization- RDO); использование гибридной структуры анализа и моделирования объекта и его элементов с учетом возможностей адекватного математического моделирования трудно формализуемых физических процессов объекта и его элементов; комплексный анализ перспективности технического решения по критериям высокого уровня с учетом структуры объекта и особенностей его функционирования как системы более высокого уровня и др.

Важным преимуществом внедрения описываемой инновационной цифровой технологии является формализация процесса разработки и доводки перспективных двигателей, а также возможность широкого использования высокоинтеллектуальных вычислительных технологий, включая передовые достижения мирового уровня, и мас-

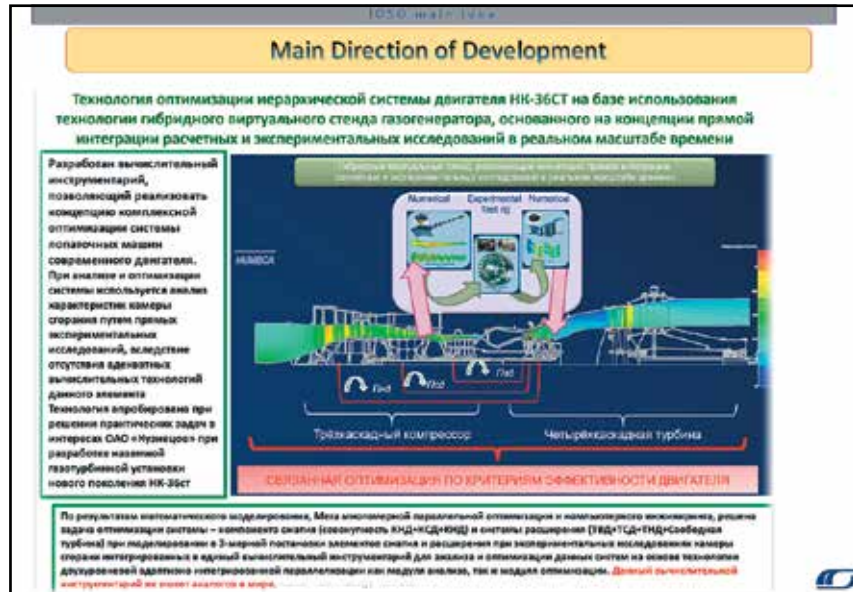


Рис. 7. Гибридный виртуальный стенд перспективного двигателя НК-36 СТ

совое вовлечение специалистов предприятий в технологический цикл для всех этапов разработки и доводки двигателей следующего поколения боевой авиации. Стратегическая значимость данной инновационной цифровой технологии заключается в ее инвариантности и применимости ее основных концептуальных технологических процессов к разработке двигателей различного назначения, в частности для дозвуковой гражданской авиации и вертолетной тематики.

Ключевой концептуальной компонентой данной инновационной технологии является технология оптимизации IOSO, которая позволяет оперативно определять спектр оптимальных технических решений для достижения предельно возможной эффективности разрабатываемого двигателя, обеспечивая его высокую конкурентоспособность на мировом рынке.

Е. Ю. Марчуков, И. Н. Егоров, ОКБ им. А. Люльки, филиал УМПО

НОВОСТИ

Datana поможет промышленникам сэкономить

Группа ЛАНИТ создала компанию Datana, которая будет заниматься цифровизацией промышленных предприятий, используя технологии Индустрии 4.0. Своей целью компания видит повышение эффективности производств в металлургии, нефтегазе и нефтехимии с применением Искусственного интеллекта и анализа данных.

Datana – это продукт на основе Искусственного интеллекта для управления технологическими и производственными процессами на предприятиях. Система содержит преднастроенные математические моде-

ли, обучаемые в процессе ее работы на реальных данных.

Помимо создания и поставок продукта Datana компания будет заниматься исследовательской деятельностью в части оптимизации технологий производства, цифровизации производственных и технологических процессов предприятий.

Владимир Захаров, директор департамента цифровых решений, генеральный директор Datana: “Расчетная экономия только на один агрегат металлургического производства, например дуговой печи или печи-ковша, достигаемая при внедрении нашего решения, составляет сотни

миллионов рублей в год. Сейчас для собственников предприятий это потерянные деньги, которые мы можем помочь им найти. Объем целевого рынка для продукта только в России оценивается в десятки миллиардов рублей в год. Несмотря на наличие конкурентов наша компания в ближайшие три года видит себя одним из лидеров рынка поставщиков решений Индустрии 4.0”.

Команда Datana видит пользу от продукта для предприятий в первую очередь в оптимизации технологических процессов. Математическая модель, настроенная на некий агрегат, либо в автоматизированном режиме через

сервис рекомендаций для оператора, либо через интеграцию с АСУ ТП, ведет технологический процесс оптимальным образом для достижения максимального качества при минимальном расходовании ресурсов. Система будет полезна для решения задач технического обслуживания и ремонта оборудования по состоянию, а не в стандартном планово-предупредительном режиме. Это позволит снизить долю аварий и сэкономить средства заказчика. Также решение подходит для контроля брака, мониторинга оборудования и увеличения точности оперативного календарного планирования и логистики.