

УДК 621.165+629.7

А.А. ТАРЕЛИН, чл.-корр. НАНУ; ИПМаш НАНУ, Харьков;
И.Е. АННОПОЛЬСКАЯ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
Ю.П. АНТИПЦЕВ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
В.В. ПАРШИН, ведущий инженер ИПМаш НАНУ, Харьков

ИНФОРМАЦИОННО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ДОВОДКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Представлена новая версия информационно-инструментальной системы, которая реализована в виде модельно-программного комплекса (МПК), что обеспечивает решение задач оптимизации та идентификации параметров та характеристик энергетических установок при их проектировании та доводке, которая инвариантна относительно математических моделей та физических исследуемых процессов. Рассмотрен подход, постановка и методы реализации задачи идентификации математической модели (ММ) авиационных газотурбинных двигателей. Приведены результаты идентификации двигателя, Д-436 ГП «Ивченко-Прогресс», полученные с помощью МПК.

Подано нову версію інформаційно-інструментальної системи, яку реалізовано у вигляді модельно-програмного комплексу (МПК), що забезпечує рішення задач оптимізації та ідентифікації параметрів та характеристик енергетичних установок при їх проектуванні та доводці, яка інваріантна відносно математичних моделей та фізичних процесів, що досліджуються. Розглянуто підхід, постановку та методи реалізації задачі ідентифікації математичної моделі (ММ) авіаційних газотурбінних двигунів. Наведено результати ідентифікації двигуна, Д-436 ДП «Івченко-Прогрес», що отримані за допомогою МПК.

We can represent new version of information and instrumental system which was realized in model and programmed complex view (MPC), providing the solving of optimization and identification problems and characteristic of the energy setting, and their projecting and operation developing, which is invariant attending searching mathematical models and physical process. The problem and the methods of the problems of identification of mathematical models (MM) of air gas turbine engine (GTE) including the experiment data were solved and examined with all their ways. The results of identification MM engines D-436 GP «Ivchenko-Progress» were represented here which were obtained owing MPC.

Введение

Создание современных энергетических установок является весьма сложной и трудоемкой задачей, которая характеризуется как использованием достижений в области термодинамики, прочности, технологии производства, так и качественными изменениями их проектирования и доводки.

Одним из важнейших вопросов повышения эффективности создания энергетических установок является системное и согласованное использование теоретических основ, методов математического моделирования, экспериментальных средств исследования и методов идентификации математических моделей (ММ) физических процессов, происходящих в исследуемых объектах, в сочетании с высокоэффективными методами оптимизации.

Такой комплексный подход и создание соответствующих систем позволит во много раз быстрее, с использованием значительно большего объема информации, чем это доступно проектировщику в обычной практике, рассмотреть множество вариантов конструкций, оценить их достоверные характеристики и на основе качественно новой технологии проектирования принять оптимальное (рациональное) решение.

Постановка задачи создания модельно-программного комплекса

Представляется актуальным создание интегрированной среды (системы), реализованной в виде модельно-программного комплекса (МПК), позволяющей в едином информационном пространстве решать задачи многоцелевой и многоуровневой оптимизации параметров и характеристик, а также их идентификации (получения адекватных математических моделей) по результатам экспериментов с использованием современных математических методов поиска оптимальных решений [1, 2]. Здесь математические модели, методы и вычислительная техника выступают как средства систематизации процесса создания и доводки энергоустановок на общей методологической, информационной и технической основе.

К разрабатываемому модельно-программному комплексу были сформулированы следующие основные технические требования:

- комплекс должен быть модульным и развивающимся, обеспечивать возможность введения новых модулей, модернизацию имеющихся, изменения набора входных и выходных данных, развития системы поддержки принятия решений, дополнения и изменения ее алгоритма;

- обеспечение возможности использования имеющихся программных продуктов (предметных модулей) с минимальными доработками;

- программный комплекс должен быть многоуровневым с возможностью перехода от более простых расчетов к более сложным в автоматизированном и диалоговом режимах; должно быть обеспечено прерывание расчетов на любом уровне с выводом результатов (в текстовом, графическом или табличном виде);

- на всех уровнях следует предусмотреть оптимизацию (в том числе и многокритериальную) рассчитываемых параметров с возможностью визуального контроля получаемых результатов;

- комплекс должен обеспечивать решение задач идентификации параметров и характеристик математической модели исследуемого объекта и его элементов по экспериментальным данным, представленным в программном, табличном или графическом виде;

- программное обеспечение должно быть технологичным в эксплуатации и доступным инженеру без специальной подготовки программиста.

Характеристика модельно-программного комплекса

С учетом всех приведенных выше требований в ИПМаш НАН Украины разработан МПК *Optimum*. Он реализован в среде разработки *Delphi* и оформлен в виде модульного, многооконного интерфейсного приложения, разработанного под системы *Windows 98*, *Windows XP*. Для нормальной его работы необходимы следующие системные ресурсы: процессор *Intel* или *AMD* с частотой 1,5 ГГц и выше; 512 Мб оперативной памяти; 500 Мб свободного дискового пространства.

В его структуру входят: математические модели (проблемные задачи), отражающие физические процессы, происходящие в проектируемом объекте, методы расчета и идентификации их параметров, характеристик и критериев идентификации; экспериментальные данные, представленные в программном, числовом (табличном) или графическом виде; диалоговая система оптимизации; архив проектных решений; программно-информационный интерфейс, обеспечивающий связь между компонентами системы.

Модульность *Optimum* обеспечивает рациональное использование системных ресурсов, высокую производительность и возможность расширения новыми

приложениями без внесения существенных изменений. Структура интегрированной среды приведена на рис. 1.

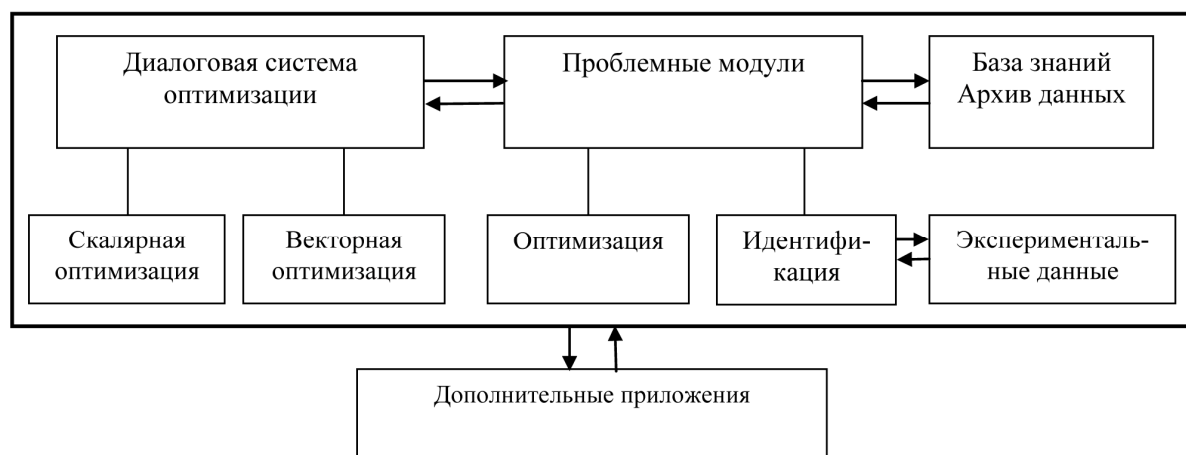


Рис. 1. Структура *Optimum*

При разработке этого программного комплекса, в соответствии с изложенными выше требованиями, особое внимание уделялось его универсальности, т.е. возможности оперативной адаптации к решению различных задач оптимизации и идентификации. Для этого методы оптимизации, проблемные задачи и «дополнительные приложения»¹ выполнены в виде динамически компокуемых библиотек (*dynamic link libraries*) и файлов данных, которые подключаются к среде по мере необходимости. При этом методы оптимизации и проблемные задачи связаны не только с базовой программой среды, но и непосредственно между собой, что значительно увеличивает скорость решения поставленной задачи.

Метод подключения проблемных задач как динамически компокуемых библиотек позволяет достаточно просто адаптировать математические модели, написанные на различных языках программирования, к *Optimum*. Это же относится и к привлечению других методов поиска оптимальных решений.

Создан интерфейс обмена данными для всего комплекса предметных модулей с их единой организацией, а также простым способом формирования входов – выходов подпрограмм и выделения из их числа оптимизируемых и идентифицируемых параметров, состав которых может широко изменяться при исследованиях.

Optimum имеет оконный интерфейс, который обеспечивает пользователю простоту и удобство доступа к ее функциям. При этом вновь вызываемые функции выполняются в новых окнах, что позволяет осуществлять различные операции одновременно и отслеживать работу программы. В процессе работы в интегрированной среде предусмотрена возможность экспортировать и импортировать исходные данные и (или) результаты расчетов в *MS Excel*, либо в текстовый файл.

Необходимо отметить, что *Optimum* имеет встроенный обработчик исключительных ситуаций, позволяющий обходить ряд ошибок, возникающих при работе проблемных задач без вмешательства пользователя. Например, при вводе данных происходит постоянный контроль на наличие логических ошибок, а в случае их обнаружения пользователю предлагаются варианты их исправления, а в процессе

¹ Перечень дополнительных приложений и их функциональные возможности приведены ниже.

поиска оптимального решения на каждом шаге характеристики, выходящие за рамки ограничений, визуально выделяются путем подсветки.

Диалоговая подсистема оптимизации, являющаяся фрагментом *Optimum*, используемые в ней численные методы поиска оптимальных решений, а также ее функциональные возможности при реализации задач оптимизации и идентификации параметров и характеристик энергетических установок достаточно подробно изложены в [2–4]. Отличительной особенностью новой версии подсистемы является: расширение векторов варьируемых параметров и ограничений на расчетные характеристики с 40 элементов до 512, наличие алгоритма решения задач многокритериальной идентификации без свертки в аддитивный критерий, дополнительные приложения.

Несколько подробнее рассмотрим «дополнительные приложения», представляющие мощный инструмент, расширяющий возможности системы. Эти подпрограммы оформлены так же как динамически компоуемые библиотеки.

«Дополнительные приложения» включают в себя:

- Подпрограмму просмотра текстовых файлов.
- Файлы экспериментальных данных.
- Подпрограмму для загрузки экспериментальных данных, представленных в числовом и (или) графическом виде.
- Подсистему построения графиков, которая представляет собой специально разработанную функцию на основе параболических интерполяционных сплайнов, позволяющую проектировщику оценивать результаты, полученные в процессе оптимизации и идентификации параметров и характеристик создаваемого объекта.
- Подпрограмму обмена исходной и полученной информацией с базой знаний и архивами данных.
- Подпрограмму выбора наилучшей аппроксимирующей зависимости.

Решение конкретных задач с использованием МПК

В качестве примера использования *Optimum*, рассмотрим идентификацию ММ одной из модификаций авиационного двигателя Д-436 ГП «Ивченко-Прогресс» в широком диапазоне режимов его эксплуатации.

Отличительной особенностью решения задач идентификации в рамках комплекса является отсутствие необходимости каких-либо преобразований математической модели объекта, т.е. расчет критериев идентификации, параметров и характеристик двигателя ведется по тем же алгоритмам, что и при проектировании. При этом обеспечивается согласование данных эксперимента с расчетными характеристиками испытываемого изделия в заданном диапазоне допустимых отклонений.

При решении задачи идентификации ММ двигателя Д-436 используется поузловая математическая модель термогазодинамического расчета второго уровня [5], в структуру которой включены характеристики узлов двигателя, система вторичных потоков (отборов и подводов воздуха для охлаждения «горячих» узлов и для регулирования давлений в полостях двигателя), отборы воздуха и мощности для нужд летательного аппарата.

Задача идентификации, в данном случае, представляет собой минимизацию ряда целевых функций (сведение к минимуму расхождений между результатами испытаний изделия и расчета по ММ для каждого из критериев идентификации) с учетом ограничений, т.е. по сути это задача многокритериальной условной оптимизации.

Для корректного решения задачи идентификации необходимо в первую очередь сформировать вектор варьируемых параметров (корректирующих коэффициентов) для поузловой ММ двигателя, а также вектор критериев идентификации.

В качестве корректирующих коэффициентов в рассматриваемой ММ выбраны коэффициенты моделирования ($k_{\text{МОД}}$) характеристик узлов двигателя по КПД – k_{η} , оборотам – k_n , степени сжатия – k_{π} , расходу – k_G , а также площади сопел наружного и внутреннего контуров, коэффициенты потерь энергии в них (всего 32 величины).

Коэффициент моделирования – $k_{\text{МОД}} = \frac{\Pi_{\text{расч}}}{\Pi_{\text{хар}}}$, где $\Pi_{\text{расч}}$ – значение параметра,

заданное в исходных данных; $\Pi_{\text{хар}}$ – значение параметра, используемое в расчетах.

В качестве контролируемых параметров и характеристик выбраны: расход топлива, идеальная тяга двигателя, давление и температура за компрессором высокого давления, суммарный расход воздуха и расход воздуха во внутреннем контуре, температура газов перед турбиной, частоты вращения роторов (всего 15 величин).

Целевые функции (критерии идентификации) представлены величинами перечисленных выше контролируемых параметров, определяемых по ММ, диапазон изменения которых устанавливается по результатам прямых измерений параметров потока по тракту двигателя, полученных при стендовых или летных испытаниях. Заданный диапазон отклонений результатов расчета от экспериментальных данных составляет $\pm (0,5-1) \%$.

Экспериментальными данными для идентификации параметров ММ являются стендовые земные дроссельные характеристики двигателя, а также характеристики двигателя в условиях полета, определенные в термобарокамере (ТБК) и на летающей лаборатории.

Параметром регулирования для получения дроссельной характеристики в проведенных испытаниях была выбрана суммарная степень сжатия $\pi_{\text{КС}}$, однако, в случае необходимости, возможен переход к другим параметрам регулирования, например – приведенному числу оборотов.

На первом этапе, по математической модели двигателя, по заданным исходным данным (в соответствии с выбранным режимом работы) и начальному значению вектора варьируемых параметров определялись значения контролируемых величин (критериев идентификации). В свою очередь, из экспериментальных характеристик были выбраны значения аналогичных параметров на том же режиме.

Далее, в соответствии с заданным в процентном отношении допустимым отклонением результатов расчета от экспериментальных данных, в автоматизированном режиме устанавливался диапазон реальных отклонений критериев идентификации, а также был задан диапазон изменения для группы варьируемых параметров.

В каждой выбранной точке базовой дроссельной характеристики двигателя, вариацией перечисленных выше корректирующих коэффициентов, с использованием методов многокритериальной оптимизации определялись значения критериев идентификации, и полученные результаты заносились в архивы МПК. Следует подчеркнуть, что поиск наилучшего варианта проводился без свертки в аддитивный критерий.

Поскольку идентификация поузловой математической модели двигателя проводилась для каждой экспериментальной точки, в результате был получен ряд адекватных ММ для конкретных точек дроссельной характеристики.

Зависимости корректирующих коэффициентов от параметра регулирования в числовом виде записывались в архивы МПК. С использованием подсистемы построения графиков, эта информация была визуализирована и также сохранялась в архивах.

Учитывая, что основной целью идентификации является создание адекватной математической модели, позволяющей получать информацию во всем диапазоне режимов работы двигателя, далее необходимо скорректировать ММ, дополнив ее аналитическими зависимостями для всех варьируемых параметров.

Для этого полученные в числовом и графическом виде изменения каждого из корректирующих коэффициентов от параметра регулирования (по дроссельной характеристике на земле и в различных условиях полета) могут быть аппроксимированы с помощью, имеющейся в МПК, программы выбора наилучшей аппроксимирующей зависимости из 36 принятых к рассмотрению уравнений. Коэффициенты регрессии этих зависимостей определяются методом наименьших квадратов. Все 36 уравнений аппроксимации ранжируются по величине коэффициента детерминации, являющегося одним из критериев качества аппроксимации [2].

Для каждого из режимов работы двигателя рассмотрены несколько вариантов решения задачи идентификации из разных начальных точек.

Анализ результатов идентификации позволил уточнить диапазоны изменения варьируемых параметров и в итеративном процессе получить наборы корректирующих коэффициентов с плавным их распределением, позволяющим выполнить аппроксимацию аналитическими зависимостями с более высоким коэффициентом детерминации, а, следовательно, обеспечить более достоверную информацию в промежуточных точках.

Далее выбранные зависимости по каждому из корректирующих коэффициентов (варьируемых параметров) заносятся в ММ.

Ниже, в качестве примера, приведены графики изменения коэффициентов моделирования характеристик отдельных узлов двигателя по $\pi_{K\Sigma}$, отвечающие результатам идентификации параметров ММ из двух начальных точек и после аппроксимации (рис. 2–3), а также соответствующие им аналитические зависимости.

$$k_{12} = k_G = 1 / (1 - 7,68x^{-12} \cdot \exp(\pi_{K\Sigma})); \quad k_{32} = k_{\eta} = \frac{1,31 \cdot \pi_{K\Sigma}^{0,93} - 1}{\pi_{K\Sigma}}$$

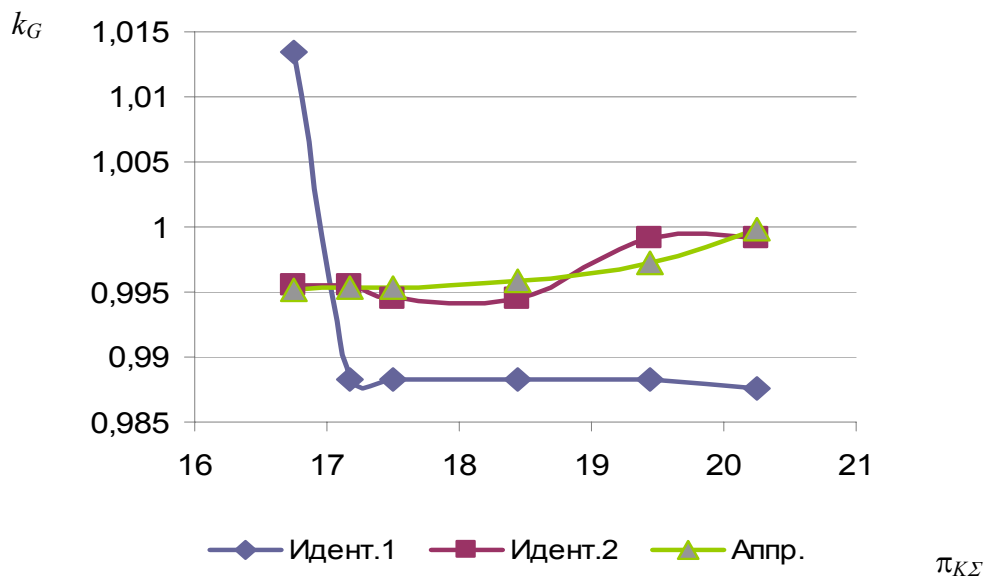


Рис. 2. Изменение коэффициента моделирования характеристики компрессора низкого давления k_G

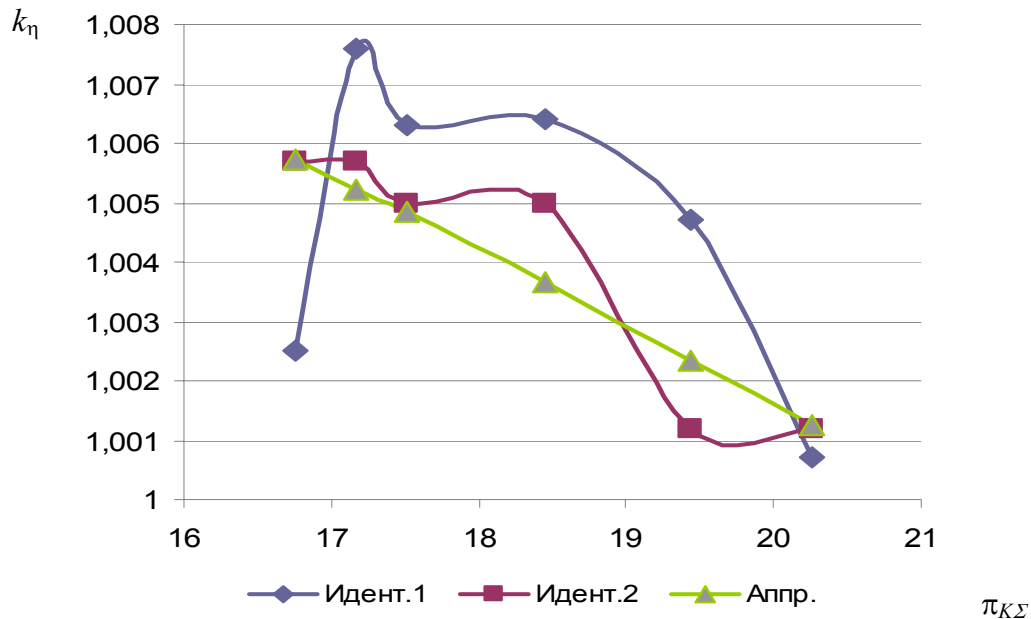


Рис. 3. Изменение коэффициента моделирования характеристики турбины вентилятора k_η

Для оценки адекватности скорректированной ММ с корригирующими коэффициентами были проведены расчеты термогазодинамических характеристик двигателя Д-436 для нескольких экспериментальных точек наземной дроссельной характеристики, при этом, коэффициенты моделирования не являлись варьируемыми параметрами, а однозначно определялись по аналитическим зависимостям, введенным в модель.

Сопоставление некоторых характеристик двигателя, полученных экспериментальным путем, с результатами расчета по идентифицированной ММ представлено на рис. 4–5.

Из анализа приведенных зависимостей следует, что параметры двигателя, найденные по уточненной поузловой математической модели термогазодинамического расчета второго уровня практически совпадают с экспериментальными данными, и однозначно не выходят за заданный диапазон отклонений $\pm 1\%$ что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Следовательно, полученная адекватная ММ двигателя Д-436 [6], может быть применена для расчета характеристик и анализа работы основных узлов и элементов в системе двигателя.

С помощью *Optimum* совместно с ГП «Ивченко-Прогресс» по результатам идентификации была разработана ММ двигателя АИ-25ТЛ [4], описывающая его характеристики во всем диапазоне режимов работы и условий эксплуатации самолета. Проведенные по ней численные исследования показали возможность увеличения ресурса без превышения максимально-допустимых значений температуры газа и частот вращения роторов.

Последующие стендовые и летные испытания полностью подтвердили расчетные характеристики двигателя, а, следовательно, и адекватность полученной ММ. В условиях высоты $H=0$ м и $M_p=0$ тяга увеличена на 7,5 %; при $H=0$ м; $M_p=0,6$; $t_n=+30$ °С тяга увеличена на 13,6 %.

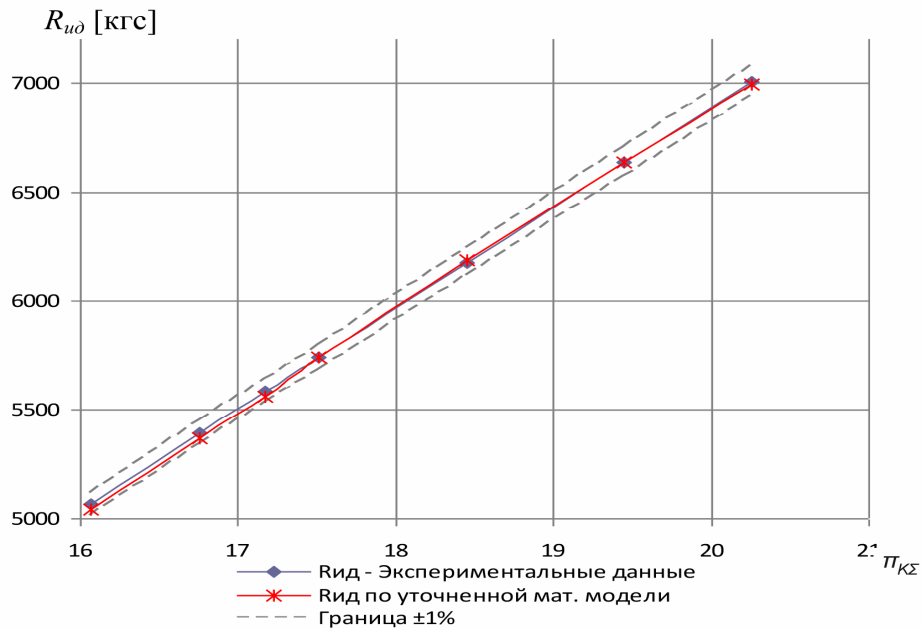


Рис. 4. Идеальная тяга

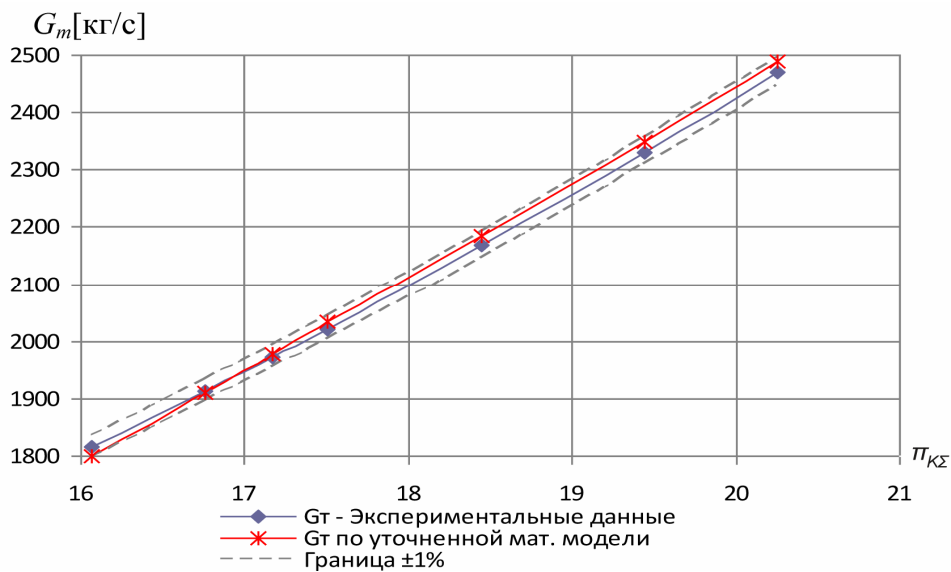


Рис. 5. Расход топлива

С помощью *Optimum* по результатам эксперимента была также проведена идентификация параметров математической модели истечения влажного пара при неравновесной конденсации.

Универсальность системы обеспечила успешное ее применение при оптимизации параметрических и дроссельных характеристик создаваемых перспективных двигателей с целью достижения максимальной тяги при минимальном весе самолета и расходе топлива; при выполнении исследований по оптимизации характеристик последней ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) с учетом потерь в выхлопном патрубке, модернизации ЦНД паровых турбин К-200-130, К-300-240 с

целью повышения их эффективности, в условиях переменного режима эксплуатации турбоагрегата [7] и др.

Так, например, анализ результатов численного эксперимента с использованием МПК позволил предложить несколько вариантов модернизации ЦНД К-200-130 и К-300-240, для которых прирост мощности, в зависимости от варианта реконструкции, составляет от 700 до 3600 кВт на один выхлоп.

Заключение

Разработана новая версия подсистемы МПК *Optimum*, обеспечивающая решение задач оптимизации и идентификации параметров и характеристик при создании энергоустановок.

Наличие адекватной математической модели, полученной с использованием МПК, позволяет сократить сроки доводки, исключить ряд экспериментальных исследований и получить достоверную информацию о параметрах и характеристиках как исследуемого объекта в целом во всем диапазоне его эксплуатации, так и отдельных его элементов. Кроме того, модель может быть использована для получения диагностической информации, носителями которой будут измеряемые параметры рассматриваемого объекта.

МПК *Optimum* внедрен на Государственном предприятии Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко и используется в реальном проектировании авиационных газотурбинных двигателей.

Универсальность и эффективность системы *Optimum*, подтверждена решением реальных задач по созданию, модернизации и доводке широкого спектра энергетических установок, что дает основание рассматривать ее как качественно новое информационно-инструментальное средство инженера-проектировщика.

Список литературы: 1. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст] / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с. 2. Тарелин, А.А. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин [Текст] / А.А. Тарелин, Ю.П. Антипцев, И.Е. Аннопольская. – Харьков: Контраст, 2001. – 224 с. 3. Антипцев, Ю.П. Модельно-программный комплекс для решения задач оптимизации и идентификации параметров создаваемых энергетических установок [Текст] / Ю.П. Антипцев, И.Е. Аннопольская, В.В. Паршин и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 4. – С. 11-14. 4. Аннопольская, И.Е. Идентификация параметров математических моделей газотурбинных двигателей по результатам испытаний на этапах проектирования и доводки [Текст] / И.Е. Аннопольская, Ю.П. Антипцев, В.В. Паршин и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 3-8. 5. Программа и методика расчета дроссельных характеристик ТРД различных схем (уровень рабочего проектирования) Технический отчет, Т/о №60/82. [Текст] / ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко. – Запорожье, 1982. 6. Аннопольская, И.Е. Создание уточненной математической модели двигателя Д-436 [Текст] / И.Е. Аннопольская, В.В. Паршин, В.В. Григорьев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 3/10 (51). – С. 62-66. 7. Малозатратная модернизация ЦНД К-300-240 с учетом переменного режима функционирования турбоагрегата и потерь энергии в выхлопном патрубке [Текст] / А.А. Тарелин, Ю.П. Антипцев, И.Е. Аннопольская, Н.А. Борисов // Наука та інновації. – 2006. – № 6. – С. 156-167.

© Тарелин А.А., Аннопольская И.Е., Антипцев Ю.П., Паршин В.В., 2012
Поступила в редколлегию 22.02.12