

различными современными и перспективными компрессорами (нагнетателями) природного газа, оснащёнными высокоэффективными СПЧ.

Проработаны два варианта конструкции регенератора – цилиндрический и котельного типа. Оба варианта выполнены по схеме с многократным перекрестным током и обеспечивают требуемое значение степени регенерации (0,85) при суммарных потерях полного давления рабочего тела ~5,5%, из которых 4% приходится на сам теплообменник, а 1,5% на трубы подвода-отвода теплоносителей. Рациональное проектирование регенератора и оптимизация геометрических характеристик пакетов позволяют достичь существенного снижения массы и габаритов теплообменника. Так, уменьшение размеров и гидравлических сопротивлений подводящих и отводящих воздухопроводов достигается за счет использования регенератора, состоящего из нескольких секций, подключенных параллельно по воздуху.

Результаты конструктивных проработок и оптимизационных расчетов показали, что более эффективно применение регенератора "котельного" типа, поверхность теплообмена которого набрана из плоских змеевиков. Змеевики скомпонованы в прямоугольном корпусе, который является частью газохода. Газ обтекает трубки снаружи, воздух течет внутри трубок и подводится (отводится) по цилиндрическим коллекторам. Схема движения теплоносителей - многократный перекрестный ток с общим противотоком. Воздух совершает 6 ходов, газ – 1 ход. Результаты предварительных проработок показывают, что масса регенератора составляет ~95 т, из которых 60 т приходится на трубный пакет. Такая конструкция позволяет освоить производство регенераторов без значительных предварительных затрат, связанных с технологической подготовкой.

Высокая надёжность (в первую очередь – долговечность) и эффективность создаваемой ГТУ должна обеспечиваться конструктивными решениями, основанными на максимальном использовании отработанных в производстве и проверенных в эксплуатации элементов и узлов двигателя.

Список литературы: 1. Щуровский В.А. Состояние и перспективы применения газотурбинных и компрессорных технологий //Газовая промышленность, № 2, 2003. С. 41-44. 2. Щуровский В.А. Основные направления развития газоперекачивающей техники //Газотурбинные технологии, № 6, 2007. С. 38-39. 3. Барский И.А., Иванов А.К. и др. Выбор температуры газа перед турбиной ГТУ КС //Газовая промышленность, № 2, 1999. С. 51-52. 4. Орберг А.Н., Сударев В.Б. и др. Прогноз начальной температуры газа газотурбинного привода ГПА //Газовая промышленность, № 5, 2005. С. 62-65. 5. Микаэлян Э.А. Совершенствование современных газотурбинных ГПА //Газовая промышленность, № 2, 2005. С. 64-67.

*Поступила в редколлегию 15.05.2008*

УДК 629.7.036.3.001

*И.Е. АННОПОЛЬСКАЯ, В.А. КОВАЛЬ, В.В. РОМАНОВ,  
А.А. ТАРЕЛИН*

## **МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГТЭ-45(60А)**

The new approach, statement and methods of implementation of a problem of identification of parameters and characteristics of mathematical models of various circuit design of the power gas-turbine engine on experimental data is observed. The problem is solved in uniform informational space by means of modern mathematical methods of search of an optimum.

В процессе создания газотурбинных двигателей (ГТД) различного применения используется большое число математических моделей (ММ), с той или иной степенью точности отражающих процессы, реализующие функционирование объекта.

Как правило, рассчитанные по этим моделям параметры, отличаются от параметров, полученных на реальном двигателе. Поэтому для успешного решения всего многообразия задач, возникающих в процессе создания и эксплуатации ГТД, необходимо иметь адекватную ММ двигателя. Для этого существует два пути:

- повышение уровня сложности ММ, т.е. более тщательное исследование и математическое описание особенностей физических процессов и взаимосвязей в объекте моделирования;
- идентификация с экспериментальными данными.

Первый путь предполагает потребность значительных вычислительных ресурсов и, как правило, не отражает особенностей, характерных для конкретно проектируемых и создаваемых изделий, что, в конечном счете, приводит к расхождению расчетных и действительных параметров двигателя.

Более технологичным и перспективным является второй путь – идентификации математической модели по результатам испытаний двигателя. При этом коррекция параметров осуществляется их вариацией, и уточнение ММ достигается только за счет изменения этих величин, без увеличения ее сложности. Это является большим преимуществом, т.к. фактически автоматизирует расчетные работы при доводке двигателя и регламентирует их последовательность.

Учитывая вышесказанное, представляется актуальным переход от математического моделирования и автоматизации проектирования отдельных элементов энергоустановок к созданию интегрированных сред (систем), позволяющих в едином комплексе 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.

В качестве объекта исследований рассмотрим разработанную на ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» энергетическую установку номинальной мощностью 45...60 МВт, предназначенную для использования в составе газотурбинной тепловой электростанции при выработке электроэнергии, как в автономном варианте, так и в варианте параллельной работы с общей электрической сетью.

Особенностью установки является возможность ее использования в двух вариантах: 45 МВт (ГТЭ-45) и 60 МВт (ГТЭ-60А). Параметры обоих вариантов установок должны обеспечиваться одним и тем же турбокомпрессором при его работе на различных частотах вращения. Это позволяет обеспечить высокую эффективность ГТЭ-45 (ГТЭ-60А) при работе по простому циклу и в составе газопаровой установки (ГПУ). Согласование частот вращения ГТД и электрогенераторов осуществляется за счет различных передаточных отношений в редукторах.

Основные параметры ГТЭ-45 (60А) приведены в таблице.

Параметры ГТУ	ГТЭ-45	ГТЭ-60А
Мощность на клеммах генератора, МВт	45	60
КПД (по мощности на клеммах генератора, %)	34,7	37,0
Расход воздуха на входе в компрессор, кг/с	134,3	170,7
Степень повышения давления в компрессоре	14,1	18,0
Температура газа за камерой сгорания, К	1548	1568
Температура газа на выходе из ГТД, °С	545	516
Частота вращения ротора турбокомпрессора, об/мин	3960	4320
Частота вращения выходного вала редуктора, об/мин	3000	3000

Двигатель имеет достаточно сложную систему отборов воздуха и подвода его для охлаждения турбины. При этом часть отбираемого за компрессором воздуха охлаждается в воздухоохладителе до температуры 150°С и в кондиционированном виде подается в СА и РК с первой по четвертую ступени и далее стравливается в масляную полость (рис.1). Суммарные отборы воздуха составляют 16,16%.

В общем-то, подобную структуру охлаждения можно формализовать в виде алгоритма решения задачи расчета характеристик машины на установившихся и переходных режимах эксплуатации с учетом детализации до уровня лопаточных венцов, что существенно повлияет на ресурсные показатели и свойства вычислительного процесса.

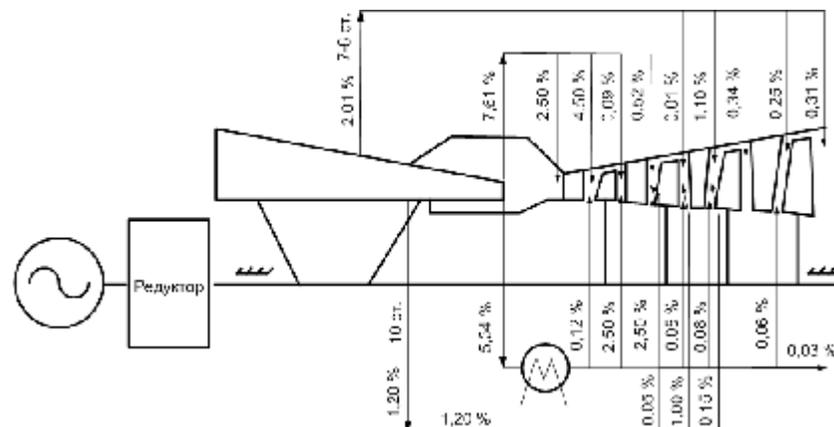


Рис. 1 – Принципиальная схема отборов и возвратов воздуха в ГТЭ-60А

В общем случае под математической моделью газотурбинного двигателя понимают совокупность уравнений, условий и ограничений, принятых для описания реальных процессов в ГТД, из которых одна часть отражает условия совместной работы основных узлов и элементов, а другая представляет собой описание их свойств и характеристик [4].

*Одновальный ГТД.* В системе уравнений невязок для такого типа машин должно отсутствовать уравнение баланса мощностей компрессора и турбины. Это обусловлено тем, что в уравнение баланса мощностей одновального двигателя

$$N_e + G_{вк} L_k - G_{гт} L_t \eta_m = 0$$

входит мощность  $N_e$ , отбираемая от ротора двигателя на привод потребителя мощности, который для моделируемой термодинамической системы двигателя является внешним устройством, не оказывающим непосредственного влияния на параметры рабочего процесса в ГТД. Отсутствие однозначной связи между мощностями турбины и компрессора позволяет при неизменной геометрии реактивного насадка в одновальном двигателе независимо изменять два параметра, а не один, как в турбореактивных двигателях. Входящие в это и последующие уравнения баланса расходы рабочего тела определяются по входу в соответствующие лопаточные машины.

В качестве независимых переменных выбраны величины, определяющие режимы работы узлов турбокомпрессора и камеры сгорания

$$x, n_{np}, \alpha_{kc}, \pi_T,$$

где  $x = tgj$  - угловая координата на напорной ветви характеристики компрессора при  $n_{np} = const$  (рис.2,3).



Если матрица коэффициентов составлена, как в данном случае, из частных производных по искомым независимым переменным, то она называется матрицей Якоби. В базовом методе Ньютона матрица Якоби пересчитывается на каждом шаге (обычно при замене частных производных их конечно-разностными аналогами). В модифицированном методе Ньютона в последующих приближениях используется матрица, полученная на первом шаге.

Опыт работы с математическими моделями ГТД показывает, что метод Ньютона при решении систем определяющих уравнений является эффективным и достаточно устойчивым. Сходимость к решению может быть нарушена только в случае чрезмерно грубых начальных приближений независимых переменных. В качестве дополняющего часто используют метод прямого поиска, минимизирующий норму простым перебором всех переменных в допустимом диапазоне их изменения. Этот метод менее быстродейственен, чем метод Ньютона, но отличается высокой надежностью. Поэтому при математическом моделировании ГТД начальную минимизацию нормы целесообразно осуществить методом прямого поиска, а после выполнения условия  $N \leq 4\varepsilon$  – применить модифицированный метод Ньютона. Решение считается допустимым, если получим  $N \leq \varepsilon$ . При этом, как правило, максимально допустимая погрешность принимается равной 0,5%.

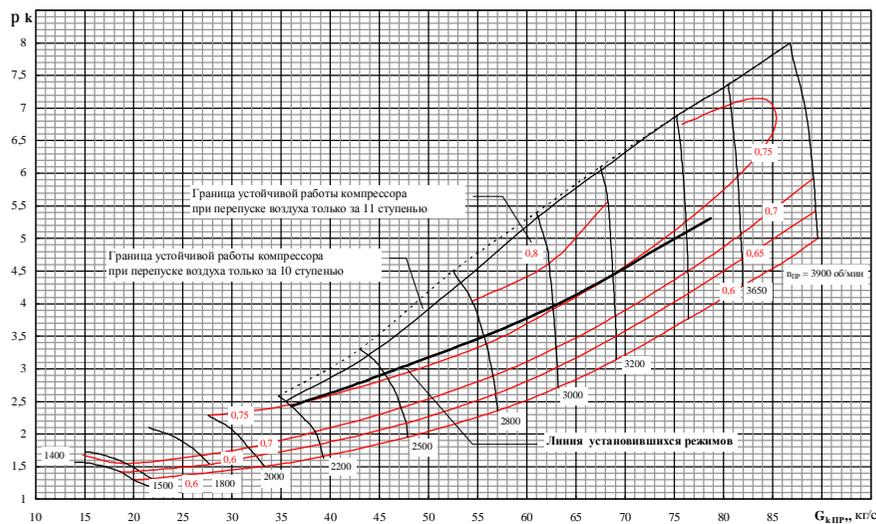


Рис. 2 – Расчетная характеристика компрессора ГТЭ-45(60А) с углами установки НА  $-30^\circ, -25^\circ, -10^\circ, -10^\circ$  и перепуском воздуха  $\Delta G=18^\circ$

В структурной схеме алгоритма программы для вычисления независимых переменных  $x, n_{пр}, \alpha_{кк}, \pi_T$ , определенный иерархический уровень занимают подпрограммы математических моделей входного и выходного устройств, компрессора, камеры сгорания и турбины.

Методология ММ рассматриваемой ГТУ основывается на расчетных/действительных характеристиках их основных узлов (Рис.1-3). При этом характеристики элементов проточной части в виде зависимости коэффициента восстановления полного давления от режимных параметров

$$\sigma = 1 - A \left( G \sqrt{P^*} / T^* \right), \text{ где } G, T^*, P^* -$$

определяются с помощью формулы параметров на входе в участок.

При определении внешней мощности коэффициенты полезного действия турбогенератора и редуктора на частичных режимах работы ГТЭ-45(60А) принимаются переменными.

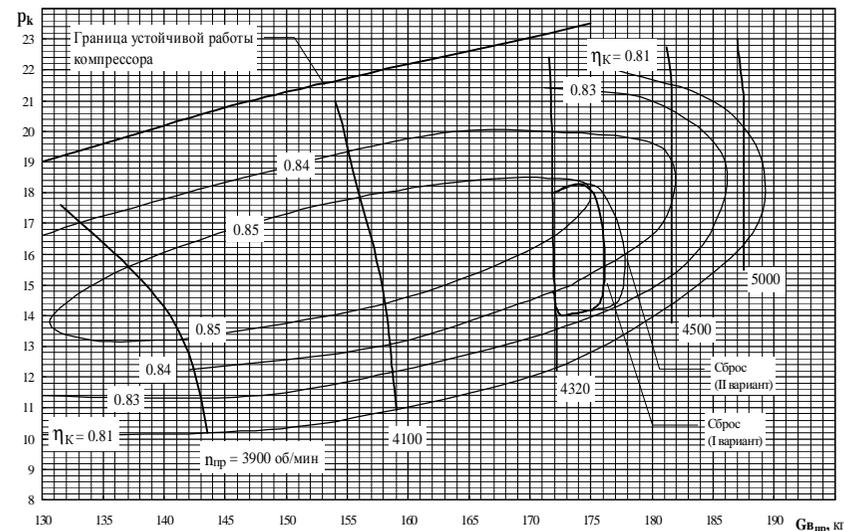


Рис. 3 – Расчетная характеристика компрессора газотурбинного двигателя установки ГТЭ-60А с углами установки НА  $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$  без перепуска

Таким образом, сформирована ММ двигателя, которую необходимо идентифицировать с целью получения адекватной модели, обеспечивающей минимум (в пределах заданных отклонений) расхождений между данными испытаний изделия и результатами расчета по модели. В некоторых случаях вместо результатов испытаний могут быть использованы расчетные данные, полученные на математических моделях более высокого уровня. При этом, проведение идентификации позволяет уточнить параметры более простых моделей и использовать их вместо сложных, без потери точности.

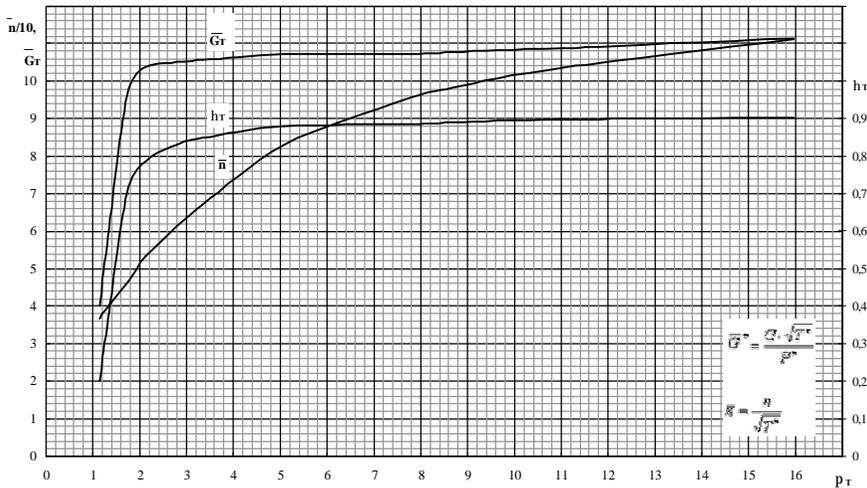


Рис. 4 – Характеристика турбины установки ГТЭ-45 (60А)

Повышение адекватности модели может быть достигнуто с помощью различных методов идентификации, при использовании результатов лабораторных, стендовых и натуральных экспериментов.

В процессе совершенствования методов идентификации пройден путь от интуитивно-логического метода до современных математических методов, реализовать которые позволили высокопроизводительные ПЭВМ.

Весомые результаты могут быть получены при решении задач идентификации в узком смысле, т.е., при решении задач с заданной структурой модели, без ее изменения, только за счет уточнения ряда параметров. Эти параметры являются варьируемыми и выбираются из числа наименее достоверных параметров модели. Чаще всего для энергетических установок это коэффициенты потерь в различных элементах, поправочные коэффициенты, отражающие изменение рабочего процесса в зависимости от режимных факторов, коэффициенты эмпирических и аппроксимационных зависимостей, входящих в состав ММ.

К наиболее часто используемым методам идентификации ММ ГТД можно отнести такие, как: наименьших квадратов; максимального правдоподобия; группового учета аргументов; уравнивания и др. [2,3]. Некоторые специфические подходы к идентификации моделей ГТД приведены в [4].

Большинство из указанных методов предусматривает линеаризацию или другое преобразование ММ в зависимости от реализуемого метода.

В настоящее время разработаны методология и программный комплекс идентификации математических моделей энергетических машин на основе

современных численных методов направленного поиска оптимальных решений, обеспечивающих реализацию задач условной оптимизации в совокупности с ММ установки, отражающей режимные факторы ее функционирования [5,6]. Отличительной особенностью такого подхода является решение задачи без каких-либо преобразований ММ, т.е. расчет критериев идентификации, параметров и характеристик двигателя ведется по тем же алгоритмам, что и при проектировании.

Именно этот подход и будет реализован при создании адекватной ММ ГТЭ-45(60А)

Поскольку задача параметрической идентификации, по сути, представляет собой минимизацию некоторой целевой функции (или нескольких функций) с ограничениями, т.е. задачу условной оптимизации, то ее решение может быть достигнуто с использованием современных математических методов поиска оптимальных решений. Последнее предполагает при постановке задачи: выбор критериев качества, варьируемых параметров и ограничений.

Критерии качества могут быть представлены величинами рассогласования между одноименными параметрами (критериями идентификации), полученными по расчетной модели двигателя и в результате эксперимента, т.н. «внешними невязками». При этом функцией цели может являться как «внешняя невязка» по одному или нескольким параметрам, так и их сумма.

Представляется целесообразным рассмотреть при решении задачи «внешние невязки» по основным параметрам двигателя: мощность на клеммах генератора, расход воздуха на входе в компрессор, температура газов перед турбиной/на выходе из ГТД, частота вращения ротора турбокомпрессора и степень повышения давления.

В общем виде минимизируемая функция может быть представлена как

$$\delta_{\Pi}(X) = |\Pi_{расч}(X) - \Pi_{эсп}|;$$

$$\Phi[\delta_{\Pi}(X^*)] = \min \Phi[\delta_{\Pi}(X)];$$

$$\Phi[\sum \delta_{\Pi}(X^*)] = \min \Phi[\sum \delta_{\Pi}(X)],$$

где  $\delta_{\Pi}$  – «внешняя невязка» по параметру  $\Pi$ ;  $X$  – вектор варьируемых параметров;  $\Pi$  – параметр двигателя;  $\Phi$  – функция цели;  $X^*$  – вектор оптимальных параметров.

В качестве варьируемых параметров, корректируемых в процессе идентификации (независимых переменных), выбираются коэффициенты моделирования  $K_{\eta}, K_n, K_{\pi}, K_G, K_{Re}$  характеристик компрессора и турбины в стандартных координатах  $\pi^*, \eta_{ad} = f[\lambda_u(n_{np}), \lambda_a(G_{np})]$ , а также гидравлические

потери, потери во входных – выходных устройствах, камере сгорания, отборы и подводы воздуха, если они есть.

Ограничения на варьируемые параметры и критерии идентификации определяются исходя из практически допустимого диапазона их изменения для конкретных условий работы двигателя. Обычно допускается отклонение от экспериментальных данных в диапазоне 0,5 – 1%.

В качестве экспериментальных характеристик могут использоваться обработанные соответствующим образом измеренные параметры двигателя, либо расчетно-экспериментальные данные, представленные в виде таблиц, графиков или некоторой программы. Привязка режимов ММ и экспериментальных характеристик может осуществляться по параметру регулирования в системе автоматического управления.

Структурная схема алгоритма идентификации ММ двигателей показана на рис. 4.

Для решения задачи идентификации используется программный комплекс [5]. На первом этапе, по математической модели двигателя, по заданным исходным данным (в соответствии с выбранным режимом работы) и начальному значению вектора варьируемых параметров определяются значения контролируемых величин (критериев идентификации). В свою очередь, из экспериментальных характеристик выбираются значения аналогичных параметров на этом же режиме. Далее, в соответствии с заданным в процентном отношении допустимым отклонением результатов расчета от эксперимента, в автоматизированном режиме определяется диапазон реальных отклонений критериев идентификации и формируется функция цели. Выбирается группа варьируемых параметров и диапазон их изменения. Затем, с использованием методов направленного поиска оптимальных решений, минимизируются «внешние невязки» между одноименными критериями идентификации, вариацией перечисленных выше параметров. Полученные результаты заносятся в архив.

Следует учесть, что в том случае, когда решается задача поиска минимума невязки по одному из критериев идентификации, на остальные критерии накладывается ограничение в заданном диапазоне отклонения от экспериментальных данных.

Тогда, при выборе методов условной оптимизации, предпочтение отдается прямым методам, не требующим вычисления производных, что значительно сокращает время поиска. В основном это: модернизированный метод Нелдера-Мида, вращающихся координат, случайного интуитивного поиска (метод Эгглайса).

Если же одновременно осуществляется поиск минимума невязок для всех или нескольких функций качества, используются методы многокритериальной оптимизации.



Рис. 5 – Структурная схема алгоритма идентификации математической модели

Поскольку идентификация осуществляется в отдельных точках поля характеристик компрессора и турбины, то в результате могут быть получены наборы коэффициентов моделирования, им соответствующие. Далее выполняется их аппроксимация, после чего корректируются характеристики компрессора и турбины и других узлов (по полученным коэффициентам).

Результаты, найденные по уточненной (идентифицированной) ММ, проверяются на соответствие экспериментальным данным.

Изложенный подход был использован при идентификации ММ одного из авиационных ГТД, для которого имелся большой набор экспериментальных данных. Некоторые результаты расчетов по модели до идентификации и после в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис 5.

Здесь наглядно можно оценить расхождение данных, полученных по неидентифицированной ММ с экспериментальной зависимостью и практически полное их совпадение после идентификации.

Таким образом, предлагаются методология и средства создания ММ ГТЭ-45(60А) на основе идентификации ее параметров и характеристик по экспериментальным данным.

Задача может быть решена с использованием модельно-программного комплекса, основными элементами которого являются: математическая модель исследуемого объекта; результаты эксперимента, представленные в числовом, графическом или программном виде; подсистема оптимизации, которая позволяет вести направленный поиск оптимального решения на основе современных математических методов.

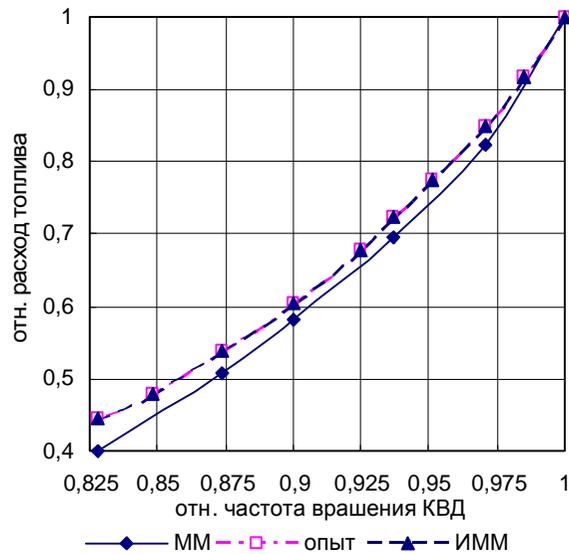


Рис. 6 – Дросельная характеристика ГТД

Решение задачи идентификации обеспечит согласование данных эксперимента с расчетными характеристиками испытываемого двигателя в заданном диапазоне допустимых отклонений ( $\pm 0,25-1\%$ ), а, следовательно, получение адекватной математической модели.

Наличие такой модели позволит сократить сроки доводки, исключить ряд экспериментальных исследований и получать достоверную информацию о параметрах и характеристиках двигателя во всем диапазоне его эксплуатации. Кроме того, модель может быть использована для получения диагностической информации, носителями которой будут измеряемые параметры рассматриваемого объекта.

Список литературы: 1. Коваль В.А., Романов В.В. и др. Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок / Б.П. – Харьков: Контраст, 2005. – 375 с. 2. Ахмедзянов А.М., Дубровский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206с. 3. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 184с. 4. Епифанов С.В., Кузнецов Б.И., Богаенко И.Н. и др. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей. – К.: Техніка, 1998. – 312с. 5. Тарелин А.А., Аннопольская И.Е., Антипов Ю.П. и др. Интегрированная среда для оптимального проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей // Вісник двигунобудування, 2007., № 2. – С. 24 – 28. 6. Тарелин А.А., Антипов Ю.П., Аннопольская И.Е. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин. – Харьков: Контраст, 2001. – 224с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 330

Г.А. ГОНЧАРОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Реструктуризация хозяйства для підвищення його гнучкості, збалансованості, стійкості до кризових явищ і зміцнення конкурентноздатності в цілому, вимагає прискорення оборотності не тільки фінансових ресурсів, але і готівки. Ця проблема важлива і для економік, що знаходяться "на розпутьті". Використання можливостей Інтернет-мережі дозволяє значно підвищити швидкість обороту усіх видів платіжних засобів. У цьому зв'язку особливу актуальність і значимість одержує побудова системи показників для виміру ефективності фінансових розрахунків у віртуальному (електронному) середовищі.

Определение эффективности финансовых расчетов – непростая задача. Если рассматривать определение эффективности с использованием традиционного подхода - как отношение результата к затратам, необходимых для достижения этого результата, то решить эту задачу однозначно, вряд ли удастся. Это связано с тем, что например, результат, т.е. эффект затрат, произведенных для достижения этого эффекта, во-первых, как бы «рассеян» по технологическим операциям, обеспечивающим проведение виртуальной сделки и расчета – как ее части. Во-вторых, затраты тоже нельзя определить однозначно. Поскольку для проведения операции на которую и выделены сегодняшние ресурсы, требуется использовать ресурсы, уже затраченные в хозяйстве ранее для создания соответствующей инфраструктуры. Как решить эту проблему?

На практике для измерения эффективности финансовых расчетов в виртуальной среде, поступают следующим образом. Финансирование развития электронных технологий, рассматривают как один из видов инновации.

При определении финансирования внедрения перспективной инновации условно можно выделить несколько этапов:

- определение общей значимости инновации и степень ее прогрессивного влияния на развитие социально-экономических процессов;

- формирование основных направлений дальнейшего перспективного финансирования

- принятой гипотезы (если принята гипотеза реализуется успешно);

- определение направлений повышения эффективности финансовых вложений (усиление практической отдачи прошлых, современных и перспективных вложений).

Именно этот третий этап требует конкретных расчетов повышения эффективности (отдачи) финансовых вложений развития системы электронных расчетов. До тех пор - эффективность рассчитывается с использованием подхода «больше-меньше». Суть подхода такова, что сравниваются во времени значения примерно одинаковых показателей. Тогда