

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ ПОТОКА И КПД- ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО МИКРОТУРБИННОГО ПРИВОДА

© 2011 В. Н. Матвеев, Л. С. Шаблий

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Получена расчётная КПД-характеристика центростремительного микротурбинного привода с помощью его электронной модели, созданной в программном комплексе ANSYS CFX. Проведена оценка адекватности расчётной характеристики результатам экспериментальных исследований с использованием регрессионного анализа.

Модель виртуальная, привод микротурбинный, исследование газодинамическое, анализ регрессионный, адекватность и статистическая значимость.

Центростремительные микротурбины и центростремительные микротурбинные приводы (ЦСМТП) в настоящее время широко применяются в составе агрегатов авиационной и ракетной техники. Малые размеры проточных частей соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) являются причиной повышенных потерь в сравнении с полноразмерными турбинами.

КПД ЦСМТП на оптимальном режиме достигает только 0,60 – 0,65, а при отклонении от оптимального режима в меньшую сторону снижается до 0,20 – 0,30. Это связано с относительно толстым пограничным слоем в межлопаточных каналах, смыканием и взаимодействием парных вихрей в лопаточных венцах, высокими потерями с выходной скоростью и в случае парциальных турбин существенными потерями от парциальности. Причём в ЦСМТП влияние структуры потока в одних элементах на рабочий процесс в других так велико, что зачастую нет возможности верно выполнить газодинамический расчет одного элемента проточной части турбопривода без учёта влияния другого [1]. Поэтому для определения характеристик ЦСМТП необходимо исследовать турбопривод в целом (эксперимен-

тальным или расчётным путём) с учётом всех элементов проточной части, в том числе входного и выходного устройств (ВУ).

КПД-характеристика является одной из основных характеристик энергетической эффективности ЦСМТП. С её помощью могут быть определены другие характеристики, такие, например, как моментная и мощностная характеристики, позволяющие оценить работоспособность турбопривода во всём диапазоне его рабочего режима. КПД-характеристика может быть найдена экспериментальным и расчётным путём. Расчётное определение характеристик является более предпочтительным, так как значительно ускоряет и удешевляет процесс исследования по сравнению с экспериментом.

Однако известные методики определения характеристик ЦСМТП [2] весьма приблизительны и не учитывают целого ряда факторов, таких, например, как влияние углов атаки на входе в СА и РК, закрутки потока газа в затурбинном устройстве. Это приводит к большим погрешностям в расчётах и предопределяет необходимость длительных и дорогостоящих экспериментальных доводочных работ.

Вместе с тем, интенсивно развивающиеся сегодня методы вычислительной газовой динамики позволяют формировать довольно точные методики газодинамиче-

ского расчёта полноразмерных турбин [3], а также создавать модели потока ЦСМТП [4], учитывающие все описанные выше особенности рабочего процесса. Последняя модель представляет собой фактически виртуальный ЦСМТП, позволяющий проводить так называемые численные эксперименты. При этом возможно выполнять расчётные исследования по влиянию режимных и конструктивных параметров на энергетическую эффективность ЦСМТП, осуществлять параметрическую и структурную оптимизацию его проточной части.

Однако для того, чтобы признать результаты такого моделирования достоверными, необходима методика оценки адекватности виртуальных газодинамических моделей. Задача создания такой методики является актуальной и соответствует современным требованиям к этапам проектирования и доводки агрегатных турбоприводов.

В основе предлагаемой методики лежит сравнение результатов газодинамического расчёта ЦСМТП [4] с результатами натурного эксперимента того же ЦСМТП. Следует отметить, что численное моделирование позволяет достаточно легко задавать любой режим работы ЦСМТП, чего не скажешь о натурных испытаниях, где режим испытаний зачастую ограничен возможностями испытательного стенда. Кроме того, иногда конструкция стенда и условия его эксплуатации [5] позволяют проводить испытания только на фиксированных режимах работы турбопривода. Поэтому для оценки адекватности результатов расчёта целесообразно заранее иметь экспериментальные данные на различных режимах работы, в том числе на расчётном режиме. Затем следует «настроить» виртуальную модель ЦСМТП (рис. 1) по результатам эксперимента на расчётном режиме за счёт верного выбора конфигурации конечно-элементной модели потока и граничных

условий, после чего рассчитать КПД-характеристику турбопривода.

В данном исследовании «настройка» виртуальной модели ЦСМТП была проведена при степени понижения давления $\pi_{\text{ТП}} = 5$ и параметре нагруженности $Y_{\text{ТП}} = 0,22$. Затем было выполнено определение значений мощностного КПД ЦСМТП при $Y_{\text{ТП}} = 0,10; 0,16; 0,27; 0,33$. Результат расчёта представлен на рис. 2. Здесь же приведены значения КПД, полученные экспериментальным путём.

Расчётные значения были аппроксимированы регрессионной моделью: $\eta_{\text{ТП}} = -1,25 \cdot Y_{\text{ТП}}^2 + 2,1 \cdot Y_{\text{ТП}}$, определяющей расчётную КПД-характеристику. Данная модель $\eta_{\text{ТП}} = f(Y_{\text{ТП}})$ была проверена на адекватность экспериментальным данным и статистическую значимость по методике регрессионного анализа, предложенной в работе [6]. Данная методика, используя F-критерий Фишера, позволяет оценить адекватность регрессионной модели и статистическую значимость полученных с её помощью результатов.

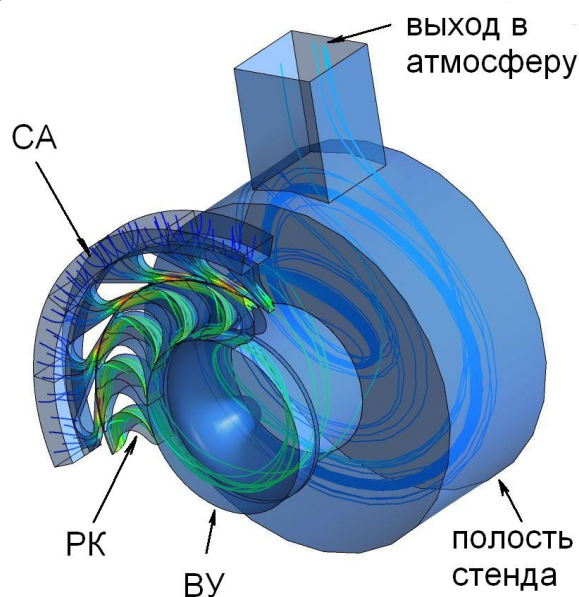


Рис. 1. Визуализация вихревого потока в CFD-модели ЦСМТП при $Y_T = 0,1$

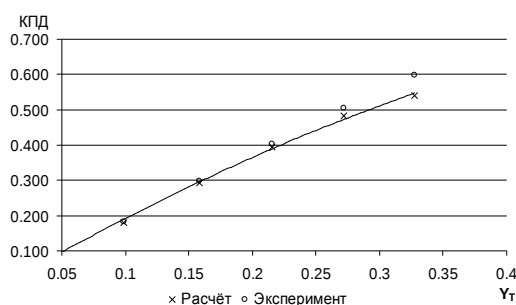


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных КПД-характеристик ЦСМТП

Для оценки адекватности модели были использованы экспериментальные значения КПД, погрешности их определения на экспериментальном стенде, расчетные значения КПД, а также соответствующие им значения КПД, рассчитанные по выражению $\eta_{ТП} = f(Y_{ТП})$. Все данные сведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные регрессионного анализа

$Y_{ТП}$	0	0,10	0,16	0,22	0,27	0,33
$\eta_{ТП \text{ э}}$	0	0,182	0,297	0,404	0,504	0,598
$\delta\eta_{ТП \text{ э}}, \%$	0	4,2	3,1	2,8	2,7	2,6
$\eta_{ТП \text{ р}}$	0	0,180	0,292	0,396	0,483	0,54
$\eta_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})$	0	0,190	0,296	0,388	0,473	0,547
$MS_{L \text{ расч}}$	$10,428 \cdot 10^{-5}$					
MS_e	$1,294 \cdot 10^{-5}$					
$MS_{\text{расч}}$	$7,316 \cdot 10^{-5}$			$64,331 \cdot 10^{-5}$		
$F_{\text{адекватности}}$	$0,73 < 2,37$			$9,58 > 2,15$		
MS_R	0,08346			0,19974		
$F_{\text{значимости}}$	$184,29 > 3,84$			$46,85 > 3,84$		

По формуле

$$MS_{L \text{ расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})_i - h_{ТП \text{ э } i})^2}{m - 3}$$

при $m = 6$ вычислен средний квадрат ошибок, обусловленных неадекватностью квадратической математической модели. Ему соответствует число степеней свободы $(m-3)$, так как три степени свободы использовано для определения квадратичной математической модели.

По формуле

$$MS_e = \frac{\sum_{i=1}^m (h_{ТП \text{ э } i} - \frac{1}{3} dh_{ТП \text{ э } i})^2}{m}$$

при $m = 6$ вычислен средний квадрат ошибок, обусловленных погрешностью эксперимента. Ему соответствует бесконечное число степеней свободы.

Затем по формуле

$$MS_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})_i - h_{ТП \text{ э } i})^2}{m}$$

вычислен средний квадрат ошибок, вызванных отличием расчетной КПД-характеристики от экспериментальной. Ему соответствует m степеней свободы.

Наконец, по формуле

$$MS_R = \sum_{i=1}^m (h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})_i - \overline{h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})})^2,$$

$$\text{где } \overline{h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})} = \left(\sum_{i=1}^m h_{ТП \text{ р}}(Y_{ТП})_i \right) / m,$$

определена сумма квадратов отклонения всех значений КПД, рассчитанных по регрессионной модели, от их среднего значения. Ей соответствует одна степень свободы.

Далее вычислены критерии, характеризующие адекватность и статистическую значимость. Адекватность регрессионной модели экспериментальным данным характеризуется отношением среднего квадрата ошибок $MS_{\text{расч}}$, умноженного на число уровней, к сумме средних квадратов ошибок, регрессионной модели и эксперимента, также умноженных на соответствующее им число уровней:

$$F = \frac{MS_{\text{расч}} \cdot m}{MS_e \cdot m + MS_{L \text{ расч}} \cdot (m - 3)} \left(\frac{m}{\infty} \right).$$

Расчетное значение F -критерия, вычисленное для шести уровней $Y_{ТП}$, составило 9,58, что больше табличного значения, которое для отношения числа степеней свободы $6/\infty$ составляет 2,15. Соответственно ошибки, обусловленные разницей экспериментальных значений КПД и значений КПД, полученных по регрессионной модели, превышают ошибки регрессионной модели и эксперимента. Таким образом, для шести уровней $Y_{ТП}$ данная модель неадекватна.

Анализ источника ошибок показал, что результаты расчета и эксперимента совпадают с точностью до 2% относительные (отн.) в области малых значений параметра

нагруженности до $Y_{TP} = 0,25$. В области $Y_{TP} > 0,25$ расхождение между экспериментальными и расчётными значениями КПД достигает 6% (отн.). Так, при $Y_{TP} = 0,1; 0,16; 0,22$ отличие расчётного КПД от экспериментального составило соответственно 1,2; 1,6; 1,8 % (отн.), а при $Y_{TP} = 0,27$ и $0,33$ - соответственно 4,3 и 6,0% (отн.). При этом погрешность экспериментального определения КПД не превышает 4,2% (отн.). Поэтому одним из критериев достоверности расчёта является совпадение расчётных и экспериментальных точек в пределах полосы $\pm 4,2\%$. Такая ситуация наблюдается в диапазоне: $Y_{TP} = 0 - 0,25$. В диапазоне: $Y_{TP} = 0,25 - 0,33$ отличие расчётных значений КПД от экспериментальных несколько превосходит погрешность эксперимента.

Поэтому было решено провести проверку адекватности регрессионной модели в области $Y_{TP} = 0 - 0,25$, т.е. для четырёх первых уровней Y_{TP} . Для этого было вычислено новое значение $MS_{расч}$ для $m=4$ (табл. 1), а также новое значение F-критерия:

$$F = \frac{MS_{расч} \cdot 4}{MS_e \cdot 4 + MS_{L_{расч}} \cdot (4 - 3)} = 0,37 \left(\frac{4}{\infty} \right).$$

Расчётное значение F-критерия, вычисленное для четырёх уровней Y_{TP} (в диапазоне: $Y_{TP} = 0 - 0,25$), составило 0,37, что меньше табличного значения, которое для отношения числа степеней свободы $4/\infty$ составляет 2,37. Соответственно ошибки, обусловленные разницей экспериментальных значений КПД и значений КПД, полученных по регрессионной модели, меньше ошибок самой регрессионной модели и эксперимента. Таким образом, в диапазоне параметра нагруженности: $Y_{TP} = 0 - 0,25$ регрессионная модель $\eta_{TP} = f(Y_{TP})$ является адекватной экспериментальным данным.

Статистическая значимость регрессионной модели оценивается отношением суммы квадратов MS_R к сумме средних квадратов всех ошибок, умно-

женных на соответствующее число уровней:

$$F = \frac{MS_R}{MS_{L_{расч}} \cdot (m - 3) + MS_e \cdot m + MS_{расч} \cdot m} \left(\frac{1}{\infty} \right).$$

Расчётное значение F-критерия, вычисленное для четырёх уровней Y_{TP} (в диапазоне адекватности регрессионной модели), составило 184,29, что больше табличного значения, которое для отношения числа степеней свободы $1/\infty$ составляет 3,84. Таким образом, величина изменения КПД в диапазоне: $Y_{TP} = 0 - 0,25$ значительно превосходит сумму всех погрешностей. Поэтому регрессионная модель КПД-характеристики $\eta_{TP} = f(Y_{TP})$ в области: $Y_{TP} = 0 - 0,25$ является статистически значимой.

Стоит отметить, что проверка в полном диапазоне: $Y_{TP} = 0 - 0,33$ (при $m=6$) показала, что данная регрессионная модель также является статистически значимой, поскольку расчётное значение F-критерия 46,85 превосходит табличное (табл. 1).

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Полученная на основании газодинамического моделирования потока в ЦСМТП регрессионная модель КПД-характеристики: $\eta_{TP} = -1,25 \cdot Y_{TP}^2 + 2,1 \cdot Y_{TP}$ статистически значима и адекватна экспериментальным данным в диапазоне параметра нагруженности: $Y_{TP} = 0 - 0,25$.

2. Методика формирования электронной модели потока ЦСМТП [4] в рассмотренном диапазоне режимных параметров может быть использована при исследовании влияния геометрических параметров на энергетическую эффективность ЦСМТП, а также при проведении параметрической и структурной оптимизации формы проточной части турбопривода.

Библиографический список

1. Матвеев, В. Н. Экспериментальное определение влияния фактора масштаба на КПД микротурбин [Текст] / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин, Н. Т. Тихонов // Изв. вузов.: Авиационная техника. – №2. – 1997. – С. 65 – 69.

2. Наталевич, А. С. Воздушные микротурбины [Текст] / А. С. Наталевич – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

3. Батулин, О. В. Построение расчётных моделей в препроцессоре Gambit универсального программного комплекса Fluent [Текст]: учебное пособие / О. В. Батулин, Н. В. Батулин, В. Н. Матвеев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – 172 с.

4. Шаблий, Л. С. Электронная модель проточной части турбинного привода для её прямой оптимизации [Текст] / Л. С. Шаблий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – № 3 (19). – Часть 2. – 2009. – С. 11-17.

5. Батулин, О. В. Экспериментальное определение характеристик малоразмерной турбины [Текст]: метод. указания к лабораторной работе / О. В. Батулин, В. Н. Матвеев, Л. С. Шаблий. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – 35 с.

6. Дмитриева, И.Б. Методика регрессионного анализа экспериментальных и расчётных характеристик сопловых аппаратов центробежных микротурбин [Текст] / И. Б. Дмитриева, В. Н. Матвеев, С. А. Нечитайло // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» – Самара. – 2006. – С. 265 – 269.

ESTIMATION OF THE ADEQUACY OF ELECTRONIC FLOW MODEL AND EFFICIENCY CHARACTERISTIC OF SMALL CENTRIPETAL TURBINE DRIVE

© 2011 V. N. Matveev, L. S. Shabliy

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

A design efficiency characteristic of a centripetal microturbine drive has been obtained with the help of its electronic model constructed in the ANSYS CFX program complex. The adequacy of the design characteristic to the results of experimental investigations with the use of regression analysis has been assessed.

Virtual model, microturbine drive, gas-dynamic research, regression analysis, adequacy and statistical significance.

Информация об авторах:

Матвеев Валерий Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, численные методы расчёта. E-mail: tdla@ssau.ru.

Шаблий Леонид Сергеевич, инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов, аспирант. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, их выходные устройства, численные методы расчёта, гидрогазодинамика, программирование. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru.

Matveev Valeriy Nikolaevitch, professor, head of the department of aircraft engine theory, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), tdla@ssau.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, numerical calculations.

Shabliy Leonid Sergeevitch, engineer of the aircraft engine theory department, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), shelbi-gt500@mail.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, turbo-machine nozzles, hydro-gas-dynamics, numerical calculations, programming.