

ПЛАНИРОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОДНОСТУПЕНЧАТЫХ ТУРБИН СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2011 В. А. Григорьев, В. М. Радько, Д. С. Калабухов

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

Показана необходимость проведения новых экспериментальных исследований для нахождения зависимостей критериев оценки эффективности одноступенчатых турбин сверхмалой мощности (ТСММ) от режимных и конструктивно-геометрических параметров. Обоснована целесообразность проведения факторного эксперимента и его преимущество над классическим многофакторным экспериментом при испытаниях ТСММ. Произведён выбор влияющих факторов планируемого эксперимента, т.е. режимных и конструктивно-геометрических параметров, существенно влияющих на КПД, массогабаритные и технико-экономические показатели ТСММ трёх типов: осевого, центростремительного и центробежного. Сформированы оптимальные ротатбельные ортогональные центральные композиционные планы факторных экспериментов при испытаниях различных типов турбин и определены их основные параметры.

Планирование эксперимента, одноступенчатые турбины сверхмалой мощности, влияющие факторы, режимные параметры, конструктивно-геометрические параметры, критерии оценки эффективности.

Введение

В работе [1] проанализированы проблемы повышения эффективности турбоприводов сверхмалой мощности (ТПСММ) и обоснована целесообразность многокритериального подхода к решению задачи оптимизации конструктивно-геометрических и режимных параметров. В настоящее время практически отсутствуют данные о влиянии этих параметров на такие критерии оценки эффективности, как массогабаритные и технико-экономические показатели ТПСММ разных типов в исследованных диапазонах значений степени понижения давления $\pi_t = 2 \dots 6$ и параметра нагруженности $Y_t = 0,1 \dots 0,3$. Кроме того, недостаточно исследовано влияние основных параметров не только на массогабаритные показатели, но и на показатели энергетической эффективности одноступенчатых ТПСММ, работающих в диапазонах значений $\pi_t = 1,1 \dots 2$ и $Y_t = 0,3 \dots 0,6$, хотя такие ТПСММ достаточно распространены в различных отраслях народного хозяйства. Поскольку аналитическое определение зависимостей критериев оценки эффективности от режимных и конструк-

тивно-геометрических параметров затруднено, необходима постановка новых экспериментальных исследований для нахождения этих зависимостей в расширенных диапазонах π_t и Y_t с привлечением теории планирования эксперимента для решения задачи идентификации математических моделей.

1. Целесообразность проведения факторного эксперимента при испытаниях ТПСММ

Все проводимые ранее экспериментальные исследования ТПСММ носили классический многофакторный характер, т.е. представляли собой последовательность однофакторных экспериментов. В однофакторном эксперименте все независимые переменные (влияющие факторы эксперимента), кроме одной, считаются постоянными. Использование классического эксперимента для всестороннего исследования многофакторного процесса требует постановки очень большого числа опытов в отличие от факторного эксперимента при заданной точности конечных результатов.

В работе [2] впервые был реализован метод оптимального расчёта многорежимных центростремительных ТПСММ (ЦС ТПСММ), учитывающий влияние на их КПД многих режимных и геометрических параметров. Достаточно высокая достоверность результатов этой работы обеспечена многолетними исследованиями её автора. В процессе этих исследований было поставлено колоссальное количество опытов. Применение последовательных однофакторных экспериментов в данном случае оправдывается отсутствием надёжной априорной информации о виде искомых функциональных зависимостей при проведении исследований. Но каковы бы ни были качество проведения классического многофакторного эксперимента и глубина анализа его результатов, он не позволяет учитывать всевозможные корреляции между варьируемыми факторами, а найденные частные одномерные или двумерные зависимости нельзя сводить в одну общую [3].

Одним из достоинств факторного эксперимента является возможность упрощения обработки результатов измерений и получение данных в виде, удобном для обобщения и анализа [4]. Так, вместо комплексного выражения, включающего зависимости КПД эталонной ступени и относительных КПД от независимых переменных по отношению к эталонной ступени (зависящие от каких-либо варьируемых параметров), можно получить одно общее выражение для КПД, учитывающее основные факторы и взаимодействия.

Недостатки существующих методик расчёта критериев энергетической эффективности на основе «метода эталонной ступени» прежде всего заключаются в относительности самого понятия эталонной ступени и применимости этих методик только при конкретной конструктивной конфигурации эталонной ступени. Это не делает такие методики универсальными, поскольку по мере выявления новых данных о рабочем процессе в ТПСММ и совершенствования технологий изготовления ТПСММ их эффективность повышается, что сказывается на характере зависимостей относительных КПД и, соответственно, значениях коэффициентов в

регрессионных выражениях для их определения. Тогда эталонная ступень должна иметь другие параметры. Трудоёмкость пересчёта зависимостей относительных КПД по отношению к новой эталонной ступени значительно выше трудоёмкости пересчёта коэффициентов в одной общей регрессионной зависимости.

2. Выбор влияющих факторов планируемого эксперимента

Правильный выбор влияющих факторов в значительной мере определяет эффективность плана, а значит, влияет на валидность результатов эксперимента и далее на процесс оптимизации конструктивно-геометрических и режимных параметров. Одним из требований, предъявляемых к плану эксперимента, является обеспечение независимости факторов, т.е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов.

Важно отметить, что влияние конструктивно-геометрических параметров входных и выходных устройств ТПСММ на массогабаритные и технико-экономические показатели турбопривода и на его КПД на настоящий момент практически не изучено. Кроме того, достаточно большое число типов нагружаемых агрегатов увеличивает сложность оценки эффективности турбоагрегатов, поскольку от вида нагрузки зависят выражения для оценки массогабаритных и технико-экономических показателей. Поэтому в качестве факторов плана эксперимента целесообразно принимать параметры ТПСММ, входящей в состав ТПСММ. Эти факторы должны удовлетворять требованию независимости.

При планировании факторного эксперимента желательно располагать некоторыми априорными сведениями о значимостях включаемых в план факторов по отношению к функциям отклика (критериям оценки эффективности) с целью сокращения временных и материальных затрат на проведение эксперимента путём отсеивания заведомо малозначимых факторов. Накопленный в течение многих лет изучения рабочего процесса ТПСММ различных типов экспериментальный материал [2, 5-16] позволяет отобрать

значимые факторы среди режимных и конструктивно-геометрических параметров.

На величину КПД, удельного расхода и, предположительно, на массу, габариты, стоимость и технологичность ТПСММ влияние оказывают такие режимные параметры, как π_T и Y_T . Между собой они связаны следующим соотношением:

$$Y_T = \frac{u_1}{c_{1s}} = \frac{\pi D_{1(ср)} n \sqrt{z_{ст}}}{60 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_0^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^k} \right)}}, \quad (1)$$

где u_1 , м/с – окружная скорость ротора на входе в рабочее колесо (РК); c_{1s} , м/с – изоэнтропическая абсолютная скорость потока на входе в РК; $D_{1(ср)}$, м – диаметр на входе в РК радиальной ТСММ (средний диаметр осевой ТСММ); n , об/мин – частота вращения ротора турбины; $z_{ст}$ – число ступеней турбины; k – показатель адиабаты рабочего тела; R , кДж/кг·К – универсальная газовая постоянная; T_0^* , К – температура на входе в сопловой аппарат (СА) турбины.

Параметр n в процессе проведения эксперимента изменяется, так как необходимо оценивать эффективность турбин в весьма широком диапазоне значений частоты вращения $n = (5 \dots 100) \cdot 10^3$ об/мин, характерном для ТСММ [2]. Также изменяется и $D_{1(ср)}$, поскольку фактор масштабности существенно влияет на величину критериев оценки эффективности [5]. Тогда из выражения (1) следует, что варьируются оба режимных параметра: π_T и Y_T , так как они независимы.

Остальные режимные параметры (приведённые скорости λ_{1s} и λ_{w2s} на выходе из СА и РК) однозначно определяются через π_T и Y_T или задаются заранее (угол атаки i на входе в РК, степень реактивности $\rho_{ср}$).

Конфигурация проточной части ступени ТСММ характеризуется совокупностью конструктивно-геометрических параметров и их соотношений. На рис. 1 приведены конструктивные схемы одноступенчатых турбин осевого и радиальных типов и их основные конструктивно-геометрические параметры.

Перечислим основные конструктивно-геометрические безразмерные параметры, используемые при проектировании ТСММ (или ее ступени в случае многоступенчатой ТСММ). Соотношения для турбин осевого типа, аналогичные по смыслу соотношениям для турбин радиальных типов, приведены в скобках:

$\alpha_{1эф}$ – эффективный угол выхода потока из СА;

$\beta_{2эф}$ – эффективный угол выхода потока из РК;

$\frac{h_{CA}}{D_1} \left(\frac{h_{CA}}{D_{ср}} \right)$ – относительная высота решётки

СА (лопатки или сопла);

ε – степень парциальности;

$\frac{a_{z\ CA}}{D_1} \left(\frac{a_{z\ CA}}{D_{ср}} \right)$ – относительное горло канала

СА;

$\frac{a_{z\ РК}}{D_2} \left(\frac{a_{z\ РК}}{D_{ср}} \right)$ – относительное горло канала

РК;

$\bar{D} = \frac{D_2}{D_1}$ – отношение выходного диаметра РК

к его входному диаметру;

$\bar{h}_{РК} = \frac{h_2}{h_1}$ – отношение высоты лопатки на

выходе из РК к высоте на входе в него;

$\bar{F}_{РК} = \frac{F_2}{F_1} = \bar{D} \bar{h}_{РК}$ – отношение площади на

выходе из РК к площади на входе в РК;

$(b/t_{ср})_{СА(РК)}$ – густота решётки СА (РК);

$\bar{\delta}_{кр\ СА(РК)} = \frac{\delta_{кр\ СА(РК)}}{a_{z\ СА(РК)}}$ – относительная толщина

выходной кромки лопатки СА (РК);

$\frac{s_{СА(РК)}}{h_{СА(РК)}}$ – удлинение решётки СА (РК);

$\bar{\delta}_o = \frac{\delta_o}{h_{СА}}$ – относительная величина осевого

зазора;

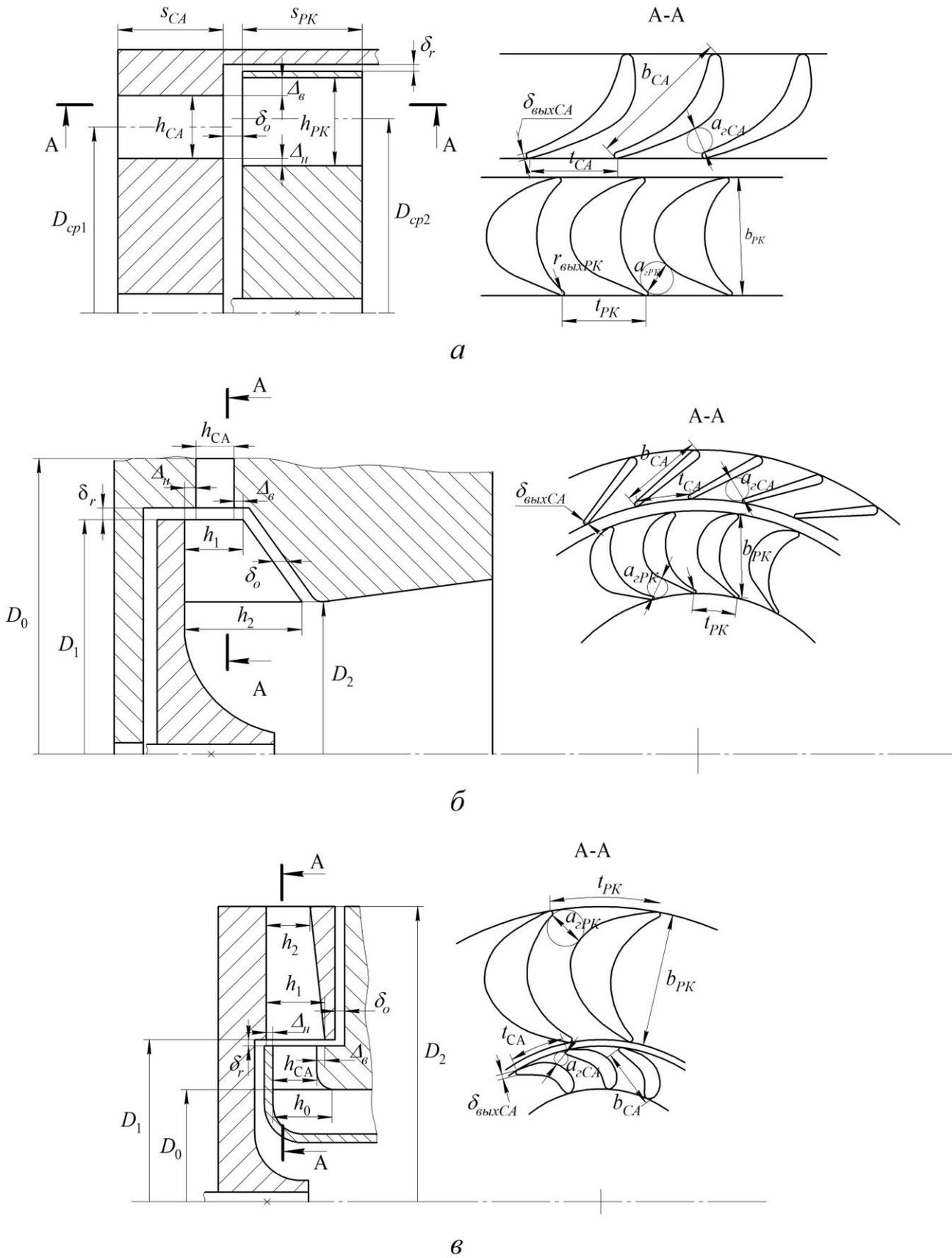


Рис. 1. Схемы одноступенчатых ТСММ и их основные параметры:
 а) осевая ТСММ (ОТСММ); б) радиальная центробежная ТСММ (ЦСТСММ);
 в) радиальная центробежная ТСММ (ЦБТСММ)

$$\bar{\Delta}_h = \frac{\Delta_h}{h_{CA}} - \text{относительная величина нижней}$$

перекрыши;

$$\bar{\Delta}_b = \frac{\Delta_b}{h_{CA}} - \text{относительная величина верхней}$$

перекрыши;

$$\bar{D}_M = \frac{D_{1(ср)}}{D_{1(ср)исп}} - \text{фактор масштабности, учи-}$$

тывающий влияние отклонения величины диаметра $D_{1(ср)}$ ступени от величины диаметра испытуемой ступени турбины $D_{1(ср)исп}$ на её эффективность;

$$\frac{h_{CA}}{h_0} - \text{степень меридиональной конфузурно-}$$

сти СА центробежной ступени;

$z_{CA}^{\varepsilon=1}$ – число межлопаточных или сопловых каналов СА при $\varepsilon = 1$;

$z_{PK}^{\varepsilon=1}$ – число межлопаточных каналов РК при $\varepsilon = 1$.

Часть представленных параметров ввиду малого разброса их возможных значений и заведомо слабого влияния на энергетическую эффективность ТСММ при испытаниях следует принять постоянными и не включать в состав вектора влияющих факторов. Таки-

ми параметрами являются $\bar{\delta}_o, \bar{\delta}_r, \frac{a_{zPK}}{D_2}, \frac{s_{PK}}{h_{PK}}$,

$(b/t)_{CA}$ и $\bar{\delta}_{кр CA(PK)}$ у ЦСТСММ [5, 6, 7]. Значения этих параметров должны выбираться оптимальными по отношению к массогабаритным и технико-экономическим критериям оценки эффективности.

Выбор факторов плана эксперимента среди конструктивно-геометрических параметров проведём, опираясь на результаты работ [2, 5–16] путём связи методов оптимизации этих параметров с планируемым экспериментом. В работе [2] для ЦСТСММ независимыми параметрами приняты $\bar{h}_{CA},$

$\bar{a}_{rCA}, \alpha_{1эф}, (b/t_{ср})_{PK}, \bar{D}, \bar{D}_M$. Здесь \bar{h}_{CA} и \bar{a}_{zCA} являются факторами масштабности по отношению к эталонной ступени и их мож-

но заменить соотношениями $\frac{h_{CA}}{D_1}$ и $\frac{a_{zCA}}{D_1}$.

При этом варьирование соотношением $\frac{a_{zCA}}{D_1}$

в случае факторной постановки эксперимента из-за конструктивных особенностей лопаточных венцов турбин и принципов построения матрицы плана эксперимента невозможно либо нецелесообразно.

Фактор масштабности \bar{D}_M однозначно

связан с $\frac{h_{CA}}{D_1}, \alpha_{1эф}, \varepsilon$, расходом рабочего тела

G и величиной диаметра $D_{исп}$ испытуемой турбины. Ввиду того, что расход газа при проектировании ТСММ является величиной известной, один из указанных геометрических параметров исключается из числа независимых переменных, в работе [2] это степень парциальности ε . Однако при проведении эксперимента величина расхода газа не является фиксированной. Имеет смысл изучить влияние параметров вне зависимости от расхода газа или мощности, которые в каждом конкретном техническом задании различны. Тогда весьма важный параметр ε должен входить в число влияющих факторов.

Обратим внимание на то, что такие важные при проектировании ТСММ параметры, как $\bar{\Delta}_b, \bar{\Delta}_h$ и \bar{F}_{PK} , в работе [1] предлагается находить после проведения оптимизации с помощью регрессионных выражений, составленных для определения оптимальных, с точки зрения обеспечения максимального КПД, значений $\bar{\Delta}_b$ и $\bar{\Delta}_h$. Эти выражения учитывают влияние ε, π_t и Y_t на $\bar{\Delta}_b$

и $\bar{\Delta}_h$. Такой подход в целом справедлив лишь в случае проведения однокритериальной оптимизации по КПД ТСММ и классической постановки многофакторного эксперимента. Но и в данном случае приходится применять схожий метод: определять оптимальные по КПД значения перекрыш для каждого из опытов с помощью регрессионных выраже-

ний. Дело в том, что однофакторные зависимости КПД ТСММ от относительных перекрыш носят довольно сложный характер и их невозможно описать полиномами степени ниже третьей во всём диапазоне возможных значений \bar{D}_b , \bar{D}_n [11, 15]. С целью недопущения неадекватности математической модели при сохранении её относительной простоты не следует включать в состав вектора влияющих факторов эксперимента соотношения \bar{D}_b и \bar{D}_n . Это вполне допустимо, так как из-за малых абсолютных величин перекрыш их изменение оказывает незначительное влияние на массу турбопривода, а стоимость его изготовления, вероятно, также практически не зависит от величины перекрыш.

Что касается соотношения \bar{F}_{PK} , то, с одной стороны, оно весьма существенно влияет на все критерии оценки эффективности [12], особенно на технологичность изготовления РК, а значит и стоимость ТПСММ в целом. С другой стороны, известные зависимости КПД от \bar{F}_{PK} можно описать полиномами второй степени, поэтому следует включить это соотношение в число влияющих факторов эксперимента.

Анализ результатов работ [5, 6, 13–15] и вышеизложенные соображения позволяют заключить, что в качестве независимых переменных в случае ОТСММ следует принять параметры, аналогичные оптимизируемым параметрам ЦСТСММ (т.е. с заменой D_1 на D_{cp}). В случае осевой схемы турбины $\bar{D} = 1$, поэтому вместо него в состав вектора независимых переменных необходимо включить соотношение $\bar{\delta}_{кр\text{CA}}$, влияющее на КПД ОТСММ во всём диапазоне его возможных значений.

Влияние конструктивно-геометрических и режимных параметров на рабочий процесс ЦБТСММ наименее изучен по сравнению с другими типами турбин. Известно лишь описание влияния на КПД конструктивно-геометрических соотношений ε , \bar{D}_b ,

\bar{D}_n , $\alpha_{1\text{эф}}$ и $(b/t_{cp})_{PK}$ [16]. Однако опыт проектирования ЦБТСММ и определённые теоретические предпосылки позволяют предположить, что такие соотношения, как $\frac{h_{CA}}{D_1}$,

$\bar{\delta}_{кр\text{CA}}$, \bar{D} , \bar{D}_M , \bar{h}_{PK} , в значительной мере определяют и эффективность ЦБТСММ.

Целесообразным является включение в состав вектора влияющих факторов ещё одного геометрического параметра – эффективного угла $\beta_{2\text{эф}}$ выхода потока в относительном движении из РК. Ранее он никогда не использовался в качестве оптимизируемого параметра, поскольку в довольно большом диапазоне своих значений не оказывает существенного влияния на КПД при $Y_t < 0,4$. Но увеличение $\beta_{2\text{эф}}$ при некотором снижении КПД приводит к увеличению технологичности изготовления РК из-за уменьшения кривизны профиля [6], что указывает на наличие области рациональных значений этого параметра относительно указанных критериев. Интерес представляет и зависимость массы ТПСММ от $\beta_{2\text{эф}}$.

Итак, общее число влияющих факторов плана эксперимента для получения математических моделей критериев оценки эффективности осевых и центростремительных одноступенчатых ТСММ равно 10, центробежных одноступенчатых ТСММ – 11.

3. Формирование планов факторного эксперимента при испытаниях одноступенчатых ТСММ

Применение методов оптимального планирования эксперимента теоретически позволяет получать математические модели критериев оценки эффективности ТСММ даже при отсутствии точных сведений о характере зависимостей этих критериев (процессов) от конструктивно-геометрических и режимных параметров [3]. При этом исследуемый процесс в ТСММ рассматривают в виде «чёрного ящика» (рис. 2) с n -мерным вектором целевой функции Y , с составляющими $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ (параметрами или функциями отклика) и действующими на его

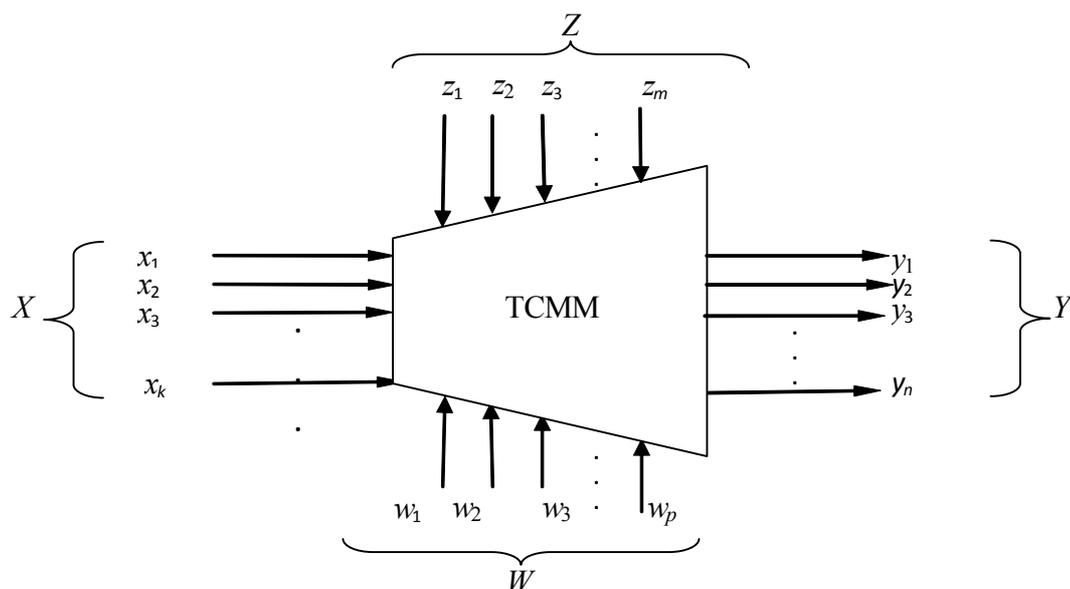


Рис. 2. Схема исследуемого процесса в TSCMM

входе параметрами, разделяющимися на три группы: x , w и z .

Первая группа представляет собой k -мерный вектор X варьируемых факторов, которые можно контролировать и целенаправленно изменять в процессе расчётного эксперимента. Вторая группа представляет собой p -мерный вектор W контролируемых, но неуправляемых параметров $\{W_i\}_{i=1}^{i=p}$, т.е. не поддающихся целенаправленному изменению в процессе эксперимента. Третья группа представляет собой m -мерный вектор Z неконтролируемых, а следовательно, и неуправляемых входных параметров.

При исследовании процессов, как правило, рассматривают параметры первой группы:

$$Y = f_i(x_1, \dots, x_k). \quad (2)$$

Вектор варьируемых факторов X для одноступенчатой ЦСТСММ в общем случае включает в себя следующие переменные:

$$x_1 = Y_r; x_2 = \pi_r; x_3 = \frac{h_{CA}}{D_1}; x_4 = \alpha_{1\text{эф}}; x_5 = \varepsilon;$$

$$x_6 = \bar{D}; x_7 = (b/t_{\text{cp}})_{\text{ПК}}; x_8 = \beta_{2\text{эф}}; x_9 = \bar{F}_{\text{ПК}};$$

$$x_{10} = \bar{D}_M.$$

В случае одноступенчатой ОТСММ вектор варьируемых переменных X включает в себя следующие переменные:

$$x_1 = Y_r; x_2 = \pi_r; x_3 = \frac{h_{CA}}{D_1}; x_4 = \alpha_{1\text{эф}}; x_5 = \varepsilon;$$

$$x_6 = \bar{\delta}_{\text{кр CA}}; x_7 = (b/t)_{\text{ПК}}; x_8 = \beta_{2\text{эф}}; x_9 = \frac{S_{CA}}{h_{CA}};$$

$$x_{10} = \bar{D}_M.$$

Вектор варьируемых факторов X для одноступенчатой ЦБТСММ определяется следующими переменными:

$$x_1 = Y_r; x_2 = \pi_r; x_3 = \frac{h_{CA}}{D_1}; x_4 = \alpha_{1\text{эф}}; x_5 = \varepsilon;$$

$$x_6 = \bar{D}; x_7 = (b/t_{\text{cp}})_{\text{ПК}}; x_8 = \beta_{2\text{эф}}; x_9 = \bar{F}_{\text{ПК}};$$

$$x_{10} = \bar{D}_M; x_{11} = \bar{\delta}_{\text{кр CA}}.$$

Ввиду большого числа варьируемых факторов применение полного факторного эксперимента (ПФЭ) приведёт к чрезвычайно большому числу необходимых опытов. Уменьшить число опытов без существенной

потери значимой информации об изучаемом процессе можно, применив дробный факторный эксперимент (ДФЭ). Однако априорно можно предположить, что использование простого ДФЭ, позволяющего описывать исследуемые зависимости линейными полиномами, может привести к заведомо неверным результатам. Дело в том, что большинство исследованных ранее экспериментальным путём однофакторных зависимостей мощностного КПД турбин от различных конструктивно-геометрических и режимных параметров зачастую характеризуются существенной нелинейностью в обычно рассматриваемом диапазоне значений этих параметров. Но если однофакторную зависимость нельзя представить линейным уравнением, то в многомерном случае поверхность отклика, несомненно, будет обладать существенной кривизной [3]. Это приводит к необходимости применения усложнённых идентификационных моделей на основе центральных композиционных дробных планов второго порядка.

Различают ортогональное и ротатабельное планирование второго порядка. При ортогональном планировании все коэффициенты квадратичной модели оцениваются независимо друг от друга, а при ротатабельном получается регрессионная модель, с одинаковой точностью предсказывающая оценку дисперсии отклика во всех направлениях от центральной точки эксперимента. Оба дробных композиционных плана состоят из трёх частей: ядра плана ДФЭ 2^{k-p} (здесь k – число факторов, p – число взаимодействий факторов), «звёздных» точек с координатами $(\pm\alpha, 0\dots 0)$, $(0, \pm\alpha, \dots 0)$, ..., $(0, 0\dots \pm\alpha)$ числом 2^k и n точек в центре плана с координатами $(0, 0\dots 0)$. В ортогональном плане, как правило, имеется одна центральная точка, а в ротатабельном плане их несколько.

Однако ортогональный план не обладает свойством ротатабельности, а ротатабельный план может быть и приближённо ортогональным [17]. Ортогональность ротатабельного плана достигается специальным выбором числа точек в центре плана.

Результаты теоретических исследований показали, что наиболее оптимальным

является ротатабельный ортогональный центральный композиционный план эксперимента (РОЦКП) с разрешающей способностью IV и степенью дробности 1/64 ядра ДФЭ. Определим основные параметры плана эксперимента при испытаниях ЦТСММ и ОТСММ.

Число точек ядра плана ДФЭ

$$N_0 = 2^{k-p} = 2^{10-4} = 64. \quad (3)$$

Минимальное число опытов (с одним опытом в центре плана)

$$N_0 = 2^{k-p} + 2 \cdot k + 1 = 64 + 2 \cdot 10 + 1 = 85. \quad (4)$$

Плечо «звёздных» точек

$$\alpha = 2^{(k-p)/4} = 2^{(10-4)/4} = 2,828. \quad (5)$$

Но для обеспечения ортогональности плана необходимо, чтобы число опытов в центре плана было равно

$$n = 4 - 2k + 2^{(k-p+4)/2} = 4 - 2 \cdot 10 + 2^{(10-4+4)/2} = 16. \quad (6)$$

Полученное число опытов в центре плана целое, поэтому ротатабельный план является и ортогональным.

Тогда общее число опытов ротатабельного плана

$$N = 2^{k-p} + 2k + 1 = 64 + 2 \cdot 10 + 16 = 100. \quad (7)$$

План является ненасыщенным, т.е. содержит избыточную информацию о модели. Эта информация при статистической обработке результатов эксперимента используется для оценки адекватности модели.

За основные факторы примем $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$. Остальные факторы являются генераторами плана и в матрице планирования представляют собой следующие произведения основных факторов:

$$x_7 = x_2 x_3 x_4 x_6; \quad x_8 = x_1 x_3 x_4 x_6; \quad x_9 = x_1 x_2 x_4 x_5; \\ x_{10} = x_1 x_2 x_3 x_5.$$

При испытаниях ЦТСММ также оптимальным является РОЦКП, который разрабатывается с учётом того, что варьируемых факторов уже не десять, а одиннадцать ($k = 11$). При этом $p = 6$, тогда по формуле (6) определяем плечо «звёздных» точек $\alpha =$

= 2,828, которое имеет такое же значение, как у РОЦКП, рассмотренного выше. По формуле (6) определяем число опытов в центре плана $n = 18$, а с помощью (7) находим общее число опытов $N = 100$. Таким образом, число опытов в обоих планах одинаковое.

Итак, показана целесообразность проведения факторного эксперимента при испытаниях ТСММ трёх основных типов, выбраны влияющие факторы эксперимента и принят РОЦКП как наиболее удовлетворяющий условиям оптимальности плана эксперимента при испытаниях ОТСММ, ЦСТСММ и ЦБТСММ. Рассчитанные значения основных параметров плана, таких, как плечо «звёздных» точек и число опытов, позволит в дальнейшем разработать матрицы планирования, включающие не только кодированные, но и реальные значения факторов, соответствующие уровням их варьирования.

Библиографический список

1. Григорьев, В. А. Анализ состояния проблемы повышения эффективности турбоприводов сверхмалой мощности и пути её решения / В. А. Григорьев, Д. С. Калабухов, В. М. Радько, Н. Ф. Мусаткин // *Авиационно-космическая техника и технологии.* – НАУ ХАИ. – Х., 2010. – №7. – С. 168-172.
2. Матвеев, В.Н. Метод проектного расчета многорежимных турбоприводов на базе центростремительных микротурбин / В.Н.Матвеев // *Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения.* Выпуск 3, часть 2. – Самара. – 1999. – С. 14-19.
3. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М: Наука, 1976. – 279 с.
4. Гишваров, А.С. Исследования авиационных силовых установок с применением планирования эксперимента / А. С. Гишваров, Г.К. Агеев. – Уфа: Уфим. гос. авиац. ин-т, 2009. – 216 с.
5. Матвеев, В.Н. Экспериментальное определение влияния фактора масштабности на КПД микротурбин / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин, Н.Т. Тихонов // *Изв. вузов. Авиационная техника.* – Казань. – 1997. – №2. – С. 65-69.
6. Наталевич, А.С. Воздушные микротурбины / А.С. Наталевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.
7. Матвеев, В.Н. Влияние толщины выходных кромок лопаток сопловой решетки на экономичность центростремительных микротурбин / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // *Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление.* – Самара: СГАУ. – 1995. – С. 22-26.
8. Матвеев, В.Н. Совместное влияние эффективного угла и величины горла на эффективность соплового аппарата центростремительной микротурбины / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин // *Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей.* – Самара: СГАУ. – 1992. – С. 80-84.
9. Матвеев, В.Н. Выбор эффективного угла сопловой решетки парциальной центростремительной микротурбины / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин // *Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей.* – Куйбышев: КуАИ. – 1990. – С. 82-86.
10. Матвеев, В.Н. Влияние густоты рабочей решетки на экономичность центростремительных микротурбин с полным подводом рабочего тела / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // *Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление.* – Самара: СГАУ. – 1998. – С. 63-66.
11. Матвеев, В.Н. Обобщение экспериментальных исследований влияния перекрыш на КПД центростремительных микротурбин / В.Н. Матвеев, Д.В. Сивиркин, Н.Т. Тихонов // *Вестник СГАУ. Серия: Актуальные проблемы производства. Технология, организация, управление.* – Самара: СГАУ. – 1998. – С. 124-136.
12. Матвеев, В.Н. Экспериментальное определение отношения высот лопаток рабочего колеса на выходе и входе радиальных центростремительных микротурбин / В.Н.Матвеев, А.Н. Тихонов, Н.Т.Тихонов // *Изв. вузов. Авиационная техника.* – Казань, 1988. – №4. – С.100-101.

13. Тихонов, Н.Т. Совместное влияние высоты лопаток соплового аппарата и степени парциальности на экономичность осевой микротурбины / Н.Т.Тихонов, Э.Э.Пфайфле // Изв. вузов. Энергетика.– Казань, 1989.– №3.– С.105-106.

14. Тихонов, Н.Т. Влияние эффективного угла сопловой решетки на экономичность осевой микротурбины с полным впуском / Н.Т.Тихонов, Э.Э.Пфайфле // Изв. вузов. Авиационная техника.– Казань, 1989.– №1.– С.111-113.

15. Мусаткин, Н.Ф. Влияние верхней и

нижней перекрыш на КПД парциальной осевой микротурбины / Н.Ф.Мусаткин, Н.Т.Тихонов // Изв. вузов. Авиационная техника.– Казань, 1979.– №3.– С.106-108.

16. Грачева, С.М. Исследование особенностей рабочего процесса воздушной центробежной микротурбины: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / С.М. Грачева.– Куйбышев: КуАИ, 1975.– 18 с.

17. Khuri A.I. Response Surfaces: Designs and Analyses / A.I. Khuri, J. A. Cornell. – Dekker, New York, 1987.– 405 p.

PLANNING A FACTORIAL EXPERIMENT FOR TESTING A SINGLE-STAGE ULTRALOW POWER TURBINE

© 2011 V. A. Grigoryev, V. M. Radko, D. S. Kalabukhov

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

The need for new experimental studies to find the dependency criteria for evaluating the effectiveness of single-stage ultralow power turbines (ULPT) on the regime and constructive-geometrical parameters has been shown. The usefulness of factorial experiments and their advantage over the classical multifactorial experiments for testing ULPTs are justified. The choice of influencing factors of the planned experiment, i.e. regime and constructive-geometrical parameters significantly affect the efficiency, weight, size and technical-economic indicators is made for ULPTs of three types: axial, centrifugal and centripetal. Optimal rotatable orthogonal central composite designs of factorial experiments for testing different types of turbines and their basic parameters are formed.

Design of experiment, single-stage ultralow power turbine, influence factors, operating conditions, structural and geometric parameters, performance measures.

Информация об авторах

Григорьев Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: grig@ssau.ru. Область научных интересов: испытание авиационных двигателей, начальное проектирование газотурбинных двигателей.

Радько Владислав Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: radko@ssau.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в турбинах сверхмалой мощности.

Калабухов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: stream_dk@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в турбинах сверхмалой мощности.

Grigoryev Vladimir Alexeevitch, doctor of technical sciences, professor of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: grig@ssau.ru. Area of research: choice of parameters and design of small gas turbine engines.

Radko Vladislav Mikhailovitch, candidate of technical sciences, associate professor of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: radko@ssau.ru. Area of research: working processes in ultralow power turbines.

Kalabukhov Dmitriy Sergeevitch, post-graduate student of the aircraft engine theory department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: stream_dk@mail.ru. Area of research: working processes in ultralow power turbines.