

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТУРБИН СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ТУРБОПРИВОДА

© 2014 Д.С. Калабухов, В.А. Григорьев, В.М. Радько

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

Турбоприводы сверхмалой мощности (ТПСММ) находят применение в аэрокосмической отрасли и в других отраслях народного хозяйства в качестве источников энергии вспомогательных агрегатов и систем. В настоящее время актуальна задача повышения их эффективности. Одним из наиболее перспективных направлений по её повышению является оптимизация параметров турбоприводов уже на начальных этапах проектирования. В статье рассмотрены вопросы оптимального проектирования турбин сверхмалой мощности (ТСММ), являющихся основным узлом турбоприводов сверхмалой мощности. Освещены основные проблемы оптимизации ТСММ в системе турбопривода в рамках системного подхода к проектированию. Поставлена задача оптимизации как задача условной векторной структурно-параметрической оптимизации. Описаны методы и алгоритмы её решения, обоснованы критерии оценки эффективности ТПСММ, выбраны оптимизируемые параметры турбин осевого и центробежного типов. В качестве критериев эффективности выбраны коэффициент полезного действия (КПД) турбины, её масса, удельный расход рабочего тела, стоимость эксплуатации турбопривода. Обоснована целесообразность выбора расчётного режима в процессе оптимизации режимных параметров по критериям оценки обобщённой по режимам эффективности ТПСММ. Приведены результаты исследований влияния неопределённости проектной информации на величины критериев.

Турбина сверхмалой мощности, турбопривод, оптимизация, выбор параметров, расчётный режим, критерии оценки эффективности, неопределённость.

По аналогии с различными техническими системами, например с авиационными газотурбинными двигателями (ГТД), входящими в состав более сложной системы – летательного аппарата [1], – турбопривод сверхмалой мощности, состоящий из входного устройства, турбины сверхмалой мощности и выходного устройства, как объект проектирования представляет собой подсистему, входящую в состав системы более высокого уровня – турбоагрегата. Турбоагрегат входит в состав энергетической установки (ЭУ) или какого-либо технологического оборудования. Поэтому при начальном проектировании целесообразно рассматривать выбор значений параметров турбин на основе оптимизации по критериям оценки эффективности турбоагрегата или ЭУ в целом. Однако такая системная оптимизация ограничивает возможности создания универсального метода автоматизированного формирования облика турбин сверхмалой мощности, поскольку область применения турбопривода может повлиять не

только на результаты оптимального проектирования, но и на саму методику постановки и решения оптимизационной задачи. Для начального этапа проектирования рекомендуется использование единых подходов к оптимизации турбоприводов, результаты которой могут служить заделом для разработки ТПСММ различного назначения.

При выборе оптимальных значений параметров турбины в системе турбопривода возникает ряд проблем, которые можно выделить в пять групп:

- обоснование метода математической оптимизации;
- обоснование критериев оценки эффективности, их числа и способа представления целевой функции задачи оптимизации;
- выбор необходимого минимума геометрических параметров, подлежащих оптимизации;
- обоснование выбора расчётного режима по заданной циклограмме измене-

ния режимных и термодинамических параметров;

- обоснование полученных результатов оптимизации в условиях неопределённости некоторых исходных данных, наличия проектных ограничений, а также допущений при расчётах.

Описанные выше проблемы свидетельствуют о сложном иерархическом и итерационном характере задачи начального проектирования ТПСММ. Их решение требует применения методов структурно-параметрической оптимизации для обоснованного формирования оптимального облика турбин сверхмалой мощности в системе многорежимного турбопривода.

Постановка задачи оптимального проектирования

Математическая формулировка задачи выбора наилучшего варианта ТСММ из множества возможных и отвечающих техническому заданию вариантов в соответствии с целевой функцией может быть представлена следующим образом. Среди независимых геометрических параметров X и режимов работы U при различных сочетаниях внешних параметров V нужно найти такие, которые обеспечивали бы наивыгоднейшее значение вектор-функции цели Y при условии удовлетворения системы функциональных и параметрических ограничений W в виде уравнений и неравенств, описывающих физические процессы, а также конструктивные, технологические, экономические и другие требования:

$$\begin{cases} Z = f(Y, W) \in R, Y(X, U, V) \rightarrow \min(\max), \\ X = (x_1, x_2, \dots, x_m), \\ U = (u_1, u_2, \dots, u_i), \\ V = (p, b_1, \dots, b_g), \\ W = (X, U, S, V) \leq 0, X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где b_p - p -й вариант задания совокупности исходных данных неопределённых величин;

p - совокупность детерминированных параметров циклограммы многорежимного ТПСММ: $p_{\text{вх}i}^*, p_{\text{вых}i}, T_{\text{вх}i}^*$.

Такая формулировка задачи оптимального проектирования определяет её как задачу условной структурно-параметрической оптимизации, решаемую методами нелинейного программирования. Ввиду многокомпонентности вектор-функции Y её решение напрямую нецелесообразно, поскольку программная реализация методов и алгоритмов в этом случае будет значительна затруднена. Поэтому требуется декомпозиция общей задачи оптимизации на ряд более простых, находящихся между собой в иерархическом соотношении.

Выбор математических методов решения задачи параметрической оптимизации во многом зависит от самого понятия оптимальности решений. Поэтому решение большинства задач параметрической векторной оптимизации наиболее рационально начинать с определения области компромиссов, т.е. подмножества возможных решений, в котором каждое из них находится в пределах допустимых отклонений локальных критериев от своих оптимальных значений

Задача оптимизации ТСММ многопараметрическая с числом параметров $m > 3$, и области наивыгоднейших значений параметров в пространстве параметров $\{X\}$ представляют собой гиперповерхности, не отображаемые в трёхмерном пространстве. Однако в случае числа критериев $r \leq 3$ эту область можно отобразить в пространстве критериев $\{Y\}$ как совокупность точек с рациональными значениями параметров. На рис. 1 показано отображение в область D_Y пространства критериев $\{Y\}$. Показанный пример справедлив для $r = 2$ и $m \geq 2$ с условием, что область рациональных значений в пространстве $\{X\}$ построена для $x_{j\text{opt}}$ с $j = 3, \dots, m$ ($j \in N$).

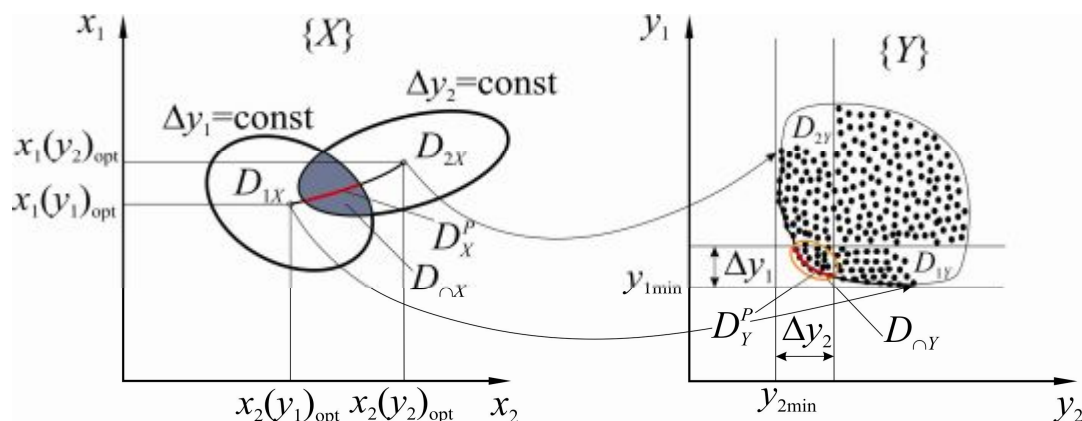


Рис. 1. Отображение вектор-функцией $Y(X)$ множества наивыгоднейших значений D_X пространства варьируемых параметров $\{X\}$ в область D_Y пространства критериев $\{Y\}$

С учётом тензорного характера задачи оптимизации ТСММ область компромиссов есть результат пересечения подмножеств параметров, наивыгоднейших по разным критериям при различных вариантах сочетаний исходных данных.

Множество значений параметров D_{cX} , заключённых внутри этой области, можно назвать *рациональными* значениями параметров. На рис. 1 показано образование области компромиссов в пространствах $\{X\}$ и $\{Y\}$. В последнем случае заметно, что часть решений из этой области лучше других. Решения, которые нельзя одновременно улучшить по нескольким критериям, называются Парето-оптимальными, и именно они в полной мере являются рациональными [1]. Геометрическая интерпретация фронта Парето D_Y^P из пространства $\{Y\}$ представляет собой множество Парето D_X^P в пространстве $\{X\}$.

Методы и алгоритмы численной параметрической оптимизации

Для решения задачи многокритериальной оптимизации можно использовать различные методы, позволяющие построить приближённую область компромиссных по Парето решений с учётом нелинейных ограничений: численные методы сканирования пространства критериев на основе взвешенных сумм, ϵ -ограничений, достижения целей [2], генетических алгоритмов [3]. Аналитические методики характеризуются сложностью реализации

алгоритмов, а методики взвешенных сумм и ϵ -ограничений предполагают скаляризацию векторной задачи, что не всегда эффективно для решения сложных оптимизационных задач в условиях неопределённости исходных данных. Основным недостатком генетических алгоритмов можно назвать зависимость результатов оптимизации от настройки алгоритма по параметрам численности популяции, селекции, кроссинговера и мутации и т.д. [3], что вносит дополнительную неопределённость в задачу оптимизации.

В работе для отыскания приближённых Парето-оптимальных решений был использован метод достижения цели Ф. Гембики [4]. Метод включает в себя множество намерений проектировщика Y^* , которое связано с множеством целей $Y(X) = \{y_1(X), y_2(X), \dots, y_s(X)\}$. Относительная недо- или передостижимость поставленных целей контролируется посредством вектора взвешенных коэффициентов $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s\}$ и может быть представлена как задача оптимизации с формулировкой

$$\begin{cases} \min_{\Gamma \in R, X \in D_\Gamma} \Gamma, \\ y_r(X) - \omega_r \Gamma \geq y_r^*. \end{cases} \quad (2)$$

Член $\omega_r \Gamma$ формирует направления поиска в пределах области допустимых значений функции $D_\Gamma \subset D_Y$ от конца вектора Ω до конца вектора возможных значений функции в пределах допуска $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_e\}$.

В задаче оптимального проектирования ТПСММ в качестве множества намерений Y^* удобно использовать вектор критериев Y_{\min} с минимальными значениями при условии оптимизации по каждому из критериев y_r в отдельности. Конечно, такое намерение недостижимо при многокритериальном поиске.

Целесообразно установить весовой вектор Ω равным исходному намерению Y^* . Тогда поиск будет вестись от точки $P \in Y^*$, а задача оптимизации (2) будет означать минимизацию вектора критериальных отклонений ΔY в пределах вектора критериальных допусков $\Delta Y_{\max} = Y_{\max} - Y_{\min}$

$$\begin{cases} \min_{\Delta Y \in R, X \in D_r} \Delta Y, \\ \frac{y_r(X) - y_r^*}{y_r^*} \geq \Delta y_r, \end{cases} \quad (3)$$

где Δy_r – величина, показывающая, на сколько процентов отличается рациональное решение от оптимального по r -му критерию. Это позволяет проектировщику оценить допустимость такого решения относительно допусков Δy_r .

Найденная таким образом область Парето-оптимальных решений включает в себя параметры, соответствующие наилучшей совокупной эффективности турбопривода во всём диапазоне вероятных значений исходных проектных данных. Если такая область оказывается слишком широкой, то для её сужения используется какой-либо принцип оптимальности. В условиях неопределённости исходных данных наиболее эффективен минимаксный принцип сужения области компромиссов, гарантирующий надёжность выбираемого решения [5]:

$$\min_q \max_r \Delta y_{qr} \rightarrow X_R^P, \quad (4)$$

где X_R^P – выбранный методом минимакса вектор рациональных параметров.

При наличии нелинейных ограничений в виде равенств и неравенств задачи поиска и последующего сужения фронта Парето можно решать с помощью алгоритмов нелинейного программирования. Для реализации методов поиска рациональных

решений использовался алгоритм последовательного квадратичного программирования (SQP), обладающий высокой эффективностью и быстрой сходимостью [6].

Обоснование и выбор критериев оценки эффективности

В большинстве случаев важнейшими критериями оценки являются энергетические характеристики привода – КПД $\eta_{\text{тп}}$ и удельный расход рабочего тела $G_{\text{тп уд}} = (G/N)_{\text{тп}}$. Однако не менее важную роль играют массогабаритные и стоимостные критерии [7], такие как масса турбопривода $M_{\text{тп}}$, удельная масса $\gamma_{\text{тп}} = (M/N)_{\text{тп}}$, стоимость жизненного цикла $S_{\text{ж тп}}$.

Оценка эффективности многорежимных турбоприводов зачастую проводится по критериям $\eta_{\text{тп}\Sigma}$ и $G_{\text{тп уд}\Sigma}$, которые характеризуют осреднённую энергетическую эффективность цикла работы турбопривода [8]. Величины этих критериев определяют потребный запас рабочего тела на борту летательного аппарата (ЛА) и, соответственно, его массу, из чего можно сделать вывод о взаимосвязи энергетической и массовой эффективности в случае автономного использования ТПСММ. Но с учётом того, что в периоды неиспользования в полёте ТПСММ (последний становится «балластом», что особенно актуально для малоразмерных ЛА специального назначения), следует учитывать и его собственную массу при комплексной оценке массовой эффективности бортового турбопривода. Такую оценку можно провести, используя критерий суммарной массы

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n G_{\text{тп}i} \tau_i + M_{\text{тп}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{тп}i}$ – средний расход рабочего тела на i -м режиме работы турбопривода;

$\tau_i = t_{i+1} - t_i$ – время работы на i -м режиме работы турбопривода, определяемое как разница между временем конца и начала работы на этом режиме.

Для оценки массового совершенства ТПСММ с заданным графиком нагрузки $N = f(\tau)$ и возможности сравнения эффективности различных по мощности турбоприводов следует использовать критерий удельной суммарной массы

$$\mu_{\text{тп}\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n G_{\text{тп}i} \tau_i + M_{\text{тп}}}{\sum_{i=1}^n N_{\text{тп}i} \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^n G_{\text{тп уд}i} N_{\text{тп}i} \tau_i + M_{\text{тп}}}{\sum_{i=1}^n L_{\text{стп}i} G_{\text{тп}i} \eta_{\text{тп}i} \tau_i} = G_{\text{тп уд}\Sigma} + M_{\text{тп уд}\Sigma} \cdot (6)$$

Отсюда следует, что критерий μ_{Σ} связывает между собой обобщённый удельный расход $G_{\text{тп уд}\Sigma}$ и удельную массу многорежимного ТПСММ $M_{\text{тп уд}\Sigma}$.

Учёт стоимостных критериев на этапе начального проектирования ТПСММ затруднён из-за слабой или нечёткой взаимосвязи между большинством составляющих таких критериев и параметрами турбины или ТПСММ в целом [7].

Также существует ряд проблем, препятствующих созданию моделей трудоёмкости изготовления лопаточных венцов. Стоит отметить, что использование моделей трудоёмкости может быть обосновано при выполнении следующих условий:

- определено оборудование, на котором будут изготавливаться ТПСММ, его материал и технология, по которой будут создаваться приводы;
- известна квалификация рабочих, создающих ТПСММ;
- производство ТПСММ носит массовый или серийный характер.

На самых ранних этапах проектирования первые два условия зачастую не выполняются, что лишает смысла оценки эффективности привода по математической модели, заложенной под конкретные условия производства. Кроме того, значительная часть аэрокосмических ТПСММ специального назначения изготавливается в порядке единичного или мелкосерий-

ного производства, и трудоёмкость их изготовления слабо влияет на принятие решений при формировании облика турбины в системе турбопривода.

Принимая во внимание вышесказанное, оценку стоимости на начальном этапе проектирования следует проводить по критерию эффективности изготовления и эксплуатации в течение периода функционирования τ

$$S_{\Sigma} = S_G \sum_{i=1}^n G_{\text{д}i} \tau_i + S_M M_{\text{тп}}, \quad (7)$$

где S_G , S_M – соответственно удельные стоимости 1 м³ сжатого газа и 1 м³ материала турбопривода, руб./м³ или руб./кг.

В случае турбопривода длительного функционирования с заданной величиной ресурса для заказчика большой интерес может представлять минимизация стоимости его эксплуатации в течение этого периода

$$S_{\Sigma p} = S_G N_p \sum_{i=1}^n G_{\text{тп}i} \tau_i + S_M M_{\text{тп}}, \quad (8)$$

где N_p – ресурс ТПСММ в циклах его функционирования, представляющий собой отношение величины ресурса τ_p к периоду функционирования τ .

Выбор оптимизируемых параметров

Выбор оптимизируемых параметров в значительной мере влияет на процесс формирования оптимального облика ТПСММ. Кроме того, эти параметры могут быть использованы в качестве варьируемых факторов в плане экспериментальных исследований для составления зависимостей критериев оценки эффективности от параметров. Одно из требований, предъявляемых к плану эксперимента – обеспечение независимости факторов, т.е. возможности установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Поэтому совокупность оптимизируемых параметров следует выбирать из условия независимости факторов плана эксперимента.

Влияние геометрических параметров входных и выходных устройств не только

на массогабаритные показатели турбопривода, но и на его КПД, на настоящий момент практически не изучено. Кроме того, достаточно большое число вариантов конструкции этих устройств повышает сложность оценки эффективности турбоагрегатов, поскольку от их типа зависят выражения для оценки массогабаритных и технико-экономических показателей. Поэтому в качестве оптимизируемых были приняты параметры ТСММ, входящей в состав ТПСММ, соответствующие параметрам плана эксперимента [9]: параметр нагруженности Y_T и степень понижения давления π_T и восемь безразмерных геометрических параметров: относительная высота лопатки $h_{CA}/D_{1(ср)}$, эффективный угол на выходе из соплового аппарата (СА) $\alpha_{1эф}$, степень парциальности ϵ , отношение выходного диаметра РК к его входному диаметру - $\bar{D} = D_2/D_1$, густота решётки $(b/t_{ср})_{РК}$, эффективный угол на выходе из рабочего колеса (РК)

$\beta_{2эф}$, отношение площади на выходе из РК ко входу - $\bar{F}_{РК} = F_2/F_1 = \bar{D}h_{РК}$ и фактор масштабности - $\bar{D}_l = D_{1(ср)}/D_{1(ср)исп}$, где $D_{1(ср)исп} = 50$ мм – диаметр испытуемой турбины с максимально достигнутым в ходе экспериментальной доводки КПД. При оптимизации осевой турбины сверхмалой мощности (ОТСММ) вместо \bar{D} и $\bar{F}_{РК}$ использовались параметры относительной толщины выходной кромки лопатки $\bar{\delta}_{крСА}$ и удлинения СА $(s/h)_{СА}$.

Обоснование и выбор расчётного режима

Для определения оптимальных геометрических параметров ТСММ необходимо выбрать режим, на котором наиболее целесообразно проводить оптимизацию. Согласно заданной циклограмме работы турбопривода он работает на нескольких режимах (рис. 2).

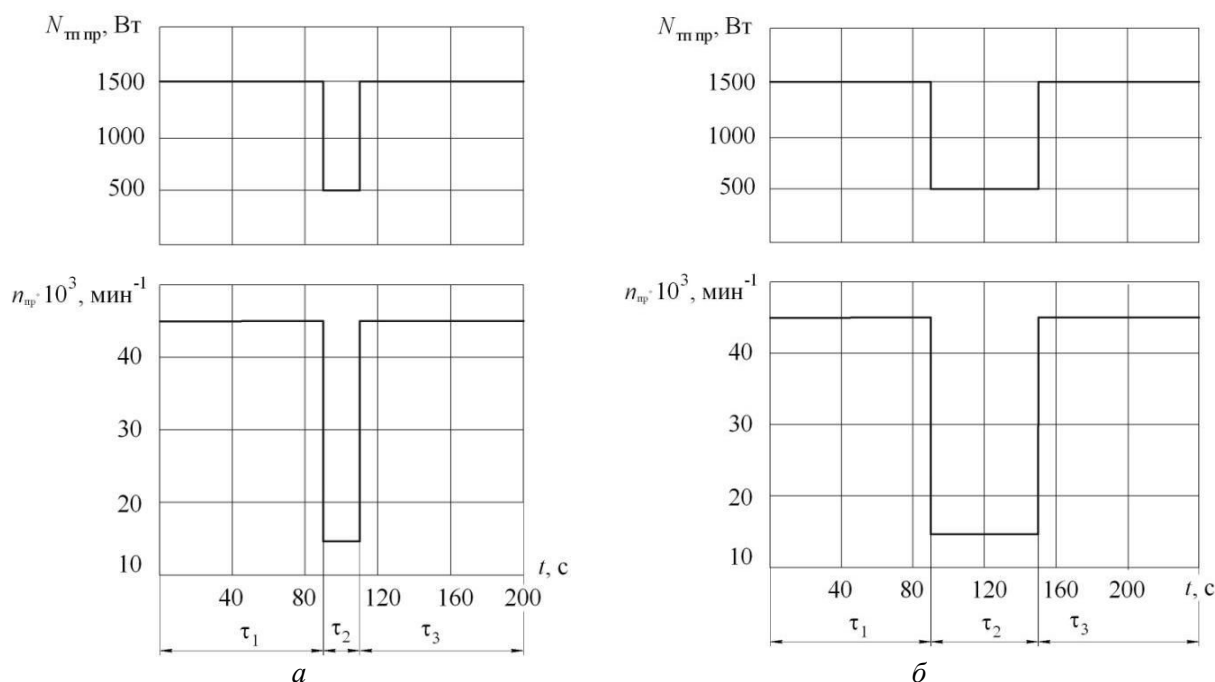


Рис.2. Варианты циклограмм работы ТПК: а) $\tau_2 = 20$ с; б) $\tau_2 = 60$ с

Каждому из этих режимов соответствуют значения параметров Y_T , π_T , мощности, удельного расхода рабочего тела и т.д. Поскольку только один режим может быть выбран в качестве расчётного, то возникают следующие вопросы: какой из

режимов наиболее целесообразен в качестве расчётного и как учесть при оптимизации геометрии на этом режиме влияние других рабочих режимов ТПСММ.

Исследования показали, что выбор в качестве расчётного одного из эксплуата-

ционных режимов по наилучшему значению КПД на этом режиме не всегда обеспечивает максимальную энергетическую эффективность в течение всего периода функционирования турбопривода. Это подтверждают результаты оптимизации центростремительной турбины сверхмалой мощности (ЦС ТСММ) по общему удельному расходу $G_{тпуд\Sigma}$ и общей удельной массе $M_{тпуд\Sigma}$ турбопривода.

Варианты циклограмм исследуемого турбопривода коммутирующего устройства (ТПК) изображены на рис. 2. Параметры внешних условий $T_{вхпр}^* = 293$ К, $p_{вхпр}^* = 600$ кПа и $p_{выхпр} = 100$ кПа оставались постоянными в течение всего периода функционирования ТПК.

Сравнение приведённых в табл.1 результатов оптимизации по критериям $G_{тпуд\Sigma}$ и $M_{тпуд\Sigma}$ показывает, что если время работы τ_i на одном из них пренебрежительно мало по сравнению с τ_i на остальных режимах (рис. 2а), то определённый в

процессе оптимизации расчётный режим почти совпадает с режимом τ_{max} , т.е. в подобных случаях можно считать расчётный режим заранее заданным. В противном случае (рис. 2б), наивыгоднейшим может оказаться режим, не совпадающий с эксплуатационным. В данном примере замена варианта расчётного режима τ_1 на режим с параметрами $N_{тппрр} = 460$ Вт и $n_{прр} = 42000$ мин⁻¹ привела к снижению $G_{тпуд\Sigma}$ на 3,5% и уменьшению $M_{тпуд\Sigma}$ на 15% при $p_{вхпр}^* = 600$ кПа, а при $p_{вхпр}^* = 250$ кПа эти величины уменьшились на 18% и 30% соответственно.

Выбор геометрии турбины с лопаточными углами на входе в рабочее колесо, которые обуславливают минимальные суммарные кромочные потери в процессе работы ТПСММ на заданных режимах, может быть реализован посредством оптимизации режима работы ТСММ, т.е. варьирования, в общем случае, режимных параметров Y_T и π_T .

Таблица 1 – К обоснованию и выбору расчётного режима ТПК

Критерий оценки эффективности	Вариант расчётного режима при $\tau_2 = 20$ с			Вариант расчётного режима при $\tau_2 = 60$ с		
	№1	№2	opt	№1	№2	opt
$G_{тпуд\Sigma}$, кг/кВт·с	0,0186	0,022	0,0186	0,0207	0,0211	0,02
$M_{тпуд\Sigma}$, кг/кВт·с	0,00074	0,001	0,00073	0,00089	0,0009	0,00072

Влияние неопределённости исходной проектной информации при выборе параметров

Отыскание области компромиссов и выбор из неё рациональных значений параметров усложняется из-за наличия в задаче оптимизации большого числа неопределённых величин, для которых отсутствуют или неизвестны законы распределения, что не позволяет решить задачу оптимизации стохастическими методами [5]. Вероятные пределы изменения величин подобных проектных данных ТПСММ можно оценить, например, с помощью метода экспертных оценок или путём анализа соответствующей научно-технической литературы. Тогда возможно

определение границы гарантируемого фронта Парето, соответствующего наиболее неблагоприятным, с точки зрения влияния на размеры последнего, сочетаниям возможных значений исходных данных.

В табл.2 представлена классификация параметров, величины которых, зачастую, не могут быть заданы единственным числом. Для отыскания устойчивых значений искомых параметров следует априорно оценить наиболее неблагоприятные сочетания исходных проектных данных неопределённой величины b_p .

Используются специальные коэффициенты чувствительности оптимальных значений x_j к изменению основных про-

ектных данных $K_{b_p}^x$, а также соответствующие коэффициенты чувствительности оптимальных величин критериев $K_{b_p}^y$:

$$K_{b_p}^x = \frac{\delta x_{opt b_p}}{\delta b_p}; K_{b_p}^y = \frac{\delta y_{opt b_p}}{\delta b_p}, \quad (9)$$

Таблица 2 – Неопределённые исходные данные задачи начального проектирования многорежимного ТПСММ

Название параметра или соотношения	Обозначение	Абсолютный диапазон изменения величины	Отношение к узлу и типу ТПСММ	Тип параметра или соотношения
Коэффициент потери заторможенного давления	$\sigma_{вх}^*$	0,85...0,95	Входное устройство	Газодинамический
Коэффициент совершенства выходного устройства	$\eta_{вых}$	0,97...0,995	Выходное устройство турбопривода с осевой турбиной	Газодинамический
Начальное давление заторможенного потока на входе в турбопривод	$p_{вхнач}^*$	1,05...6	Входное устройство	Режимный
Период работы на одном режиме	τ	Задаётся циклограммой	-	Режимный
Коэффициент увеличения длины турбопривода	$k_{лвх}$	0,5...5	Входное устройство	Конструктивный
Коэффициент увеличения длины турбопривода	$k_{лвых}$	1...5	Выходное устройство	Конструктивный
Отношение ширины обода заготовки РК к диаметру на входе в РК	$B_{н}/D_1$	0,1...0,15	Центростремительная турбина	Конструктивно-технологический
Относительный осевой зазор	$\delta_o/h_{сА}$	0,125...0,625 0,16...0,48	Центростремительная турбина Осевая турбина	Конструктивно-технологический

где $\delta x_{opt b_p} = \frac{x_{opt b_p} - x_{opt баз}}{x_{opt баз}}$;

$$\delta y_{b_p}^* = \frac{y_{b_p}^* - y_{баз}^*}{y_{баз}^*};$$

$$\delta b_p = \frac{b_p - b_{баз}}{b_{баз}} \text{ - относительное изменение}$$

p -го варианта задания исходных данных вектора неопределённых величин.

Влияние неопределённости исходных данных было рассмотрено на примере проектирования турбопривода на постоянном режиме с $N_{тппр} = 700$ Вт, $n_{пр} = 15000$ мин⁻¹. Температура на входе $T_{вх}^* = 300$ К, давление на выходе $p_{вых} = 100$ кПа. Давление $p_{вх}^*$ выдерживалось постоянным, однако его величина заранее неопределённа. Турбопривод проектировался в двух вариантах схемного исполнения. Диапазоны изменения влияющих исходных данных в абсолютном и относитель-

ном виде приведены в табл. 3. За базовые значения принимались наилучшие по отношению к величинам критериев оценки эффективности.

Таблица 3 – Относительное изменение величин неопределённых данных в диапазонах от наихудшего до наилучшего варианта их значений

Параметр b_p	Диапазон изменения величины	Относительное изменение величины δb_p
$\sigma_{вх}$	0,85...0,95	-0,105
$p_{вх}^*$, кПа	200...600	2 (по $\eta_{тп}$); -0,67 (по S_{Σ})
τ , с	20...60	2
$k_{лвх}$	0,5...5	9
$k_{лвых}$	1...5	4
$B_{н}/D_1$	0,1...0,15	0,5
$\eta_{вых}$	0,97...0,995	-0,025
S_G , руб./м ³	0,3...0,8	1,667
S_M , руб./кг	120...180	0,5

Результаты исследований по влиянию неопределённости некоторых исходных данных на величины критериев оценки эффективности показаны на рис.3. Все

зависимости построены при фиксации значений остальных неопределённых величин, соответствующих середине диапазонов их разброса.

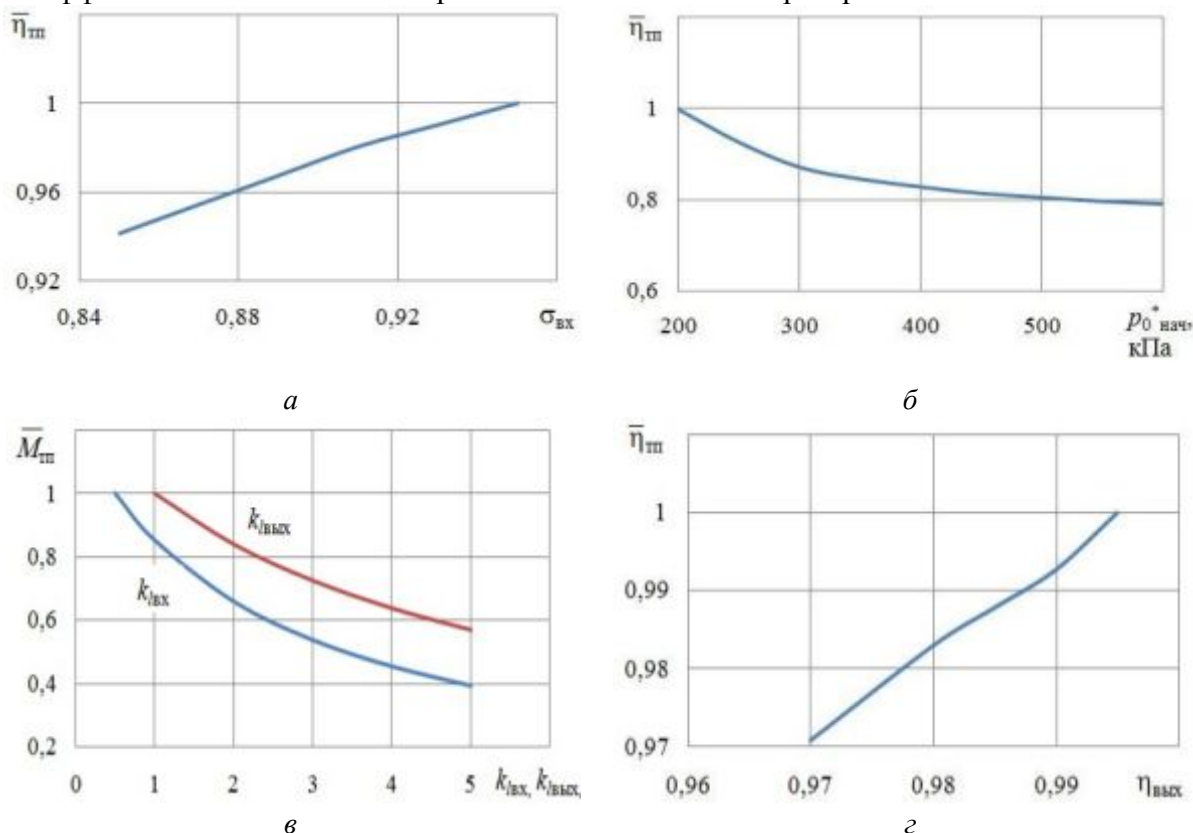


Рис. 3. Влияние изменения исходных данных на относительные величины критериев оценки эффективности:

$$а) \bar{\eta}_{тп} = \frac{\eta_{тп}}{\eta_{тп\max}} = f(\sigma_{вх}); б) \bar{\eta}_{тп} = f(p_0^* \text{ нач}); в) \bar{M}_{тп} = \frac{M_{тп\min}}{M_{тп}} = f(k_{1вх}) \text{ и } \bar{M}_{тп} = f(k_{1вых}); г) \bar{\eta}_{тп} = f(\eta_{вых})$$

Исследования показали, что на массовые и энергетические критерии оценки эффективности влияют, соответственно, параметры конструктивного и газодинамического типов, но лишь часть влияющих факторов способствует смещению величин оптимизируемых параметров, а величина S_G и вовсе не влияет на эффективность турбопривода (впрочем, это справедливо лишь для турбоприводов кратковременного функционирования). Тем не менее, значения коэффициентов $K_{b_p}^x, K_{b_p}^y$ влияющих факторов и характер протекания зависимостей на рис. 3 позволяет сделать заключение о целесообразности учёта неопределённости исходных данных на этапе начального проектирования ТСММ и применения методов поиска

гарантированных устойчивых решений при формировании рационального облика ТПСММ.

Выводы

В статье описаны основные проблемы оптимального проектирования турбин сверхмалой мощности, аналогичные тем, что возникают при оптимизации параметров авиационных ГТД [5]. Для решения каждой из этих проблем возможны различные подходы, но наиболее целесообразным является оптимизация режимных и геометрических параметров ТСММ в системе определённого турбопривода на основе критериев оценки его эффективности.

Показана целесообразность применения метода выбора оптимального ре-

жима, отличного от известного [8] тем, что режимные параметры оптимизируются наряду с геометрическими, что обеспечивает возможность минимизации кромочных потерь в процессе функционирования турбопривода по всем эксплуатационным режимам.

Приведены результаты исследований по влиянию параметров неопределённых величин на основные критерии оценки эффективности ТПСММ. Сделан вывод о существенном влиянии выбора значений таких параметров на результаты оптимизации, вследствие чего необходим учёт неопределённости исходной проек-

тной информации для получения оптимальных решений при выборе параметров ТСММ.

Полученные в статье результаты и выводы могут быть использованы в процессе формирования рационального конструктивно-геометрического облика ТСММ в системе турбопривода.

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы по повышению конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

Библиографический список

1. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 256 с.
2. Трифонов А.Г. Optimization Toolbox 2.2. Руководство пользователя. http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/-21.04.12.html.
3. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: Астраханский университет, 2007. 87 с.
4. Gembicki F.W. Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices. Ph.D. Thesis, Case Western Reserve Univ. Cleveland, Ohio, 1974.
5. Маслов В.Г., Кузьмичёв В.С., Коварцев А.Н., Григорьев В.А. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД: учеб. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. 147 с.
6. Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации: учебное пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 304 с.
7. Григорьев В.А., Радько В.М., Калабухов Д.С. Выбор и обоснование критериев оценки эффективности турбоприводов сверхмалой мощности // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч. 1. Самара: СГАУ, 2011. С. 42-43.
8. Матвеев В.Н. Метод проектного расчёта многорежимных турбоприводов на базе центростремительных турбин // Вестник СГАУ. Серия: Проблемы развития двигателестроения. 1999. Вып. 3, ч. 2. С. 14-19.
9. Григорьев В.А., Радько В.М., Калабухов Д.С. Планирование факторного эксперимента при испытаниях одноступенчатых турбин сверхмалой мощности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 6(30). С. 81-91.

Информация об авторах

Калабухов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник научно-образовательного центра газодинамических исследований, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail:

dskalabuhov@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в турбинах сверхмалой мощности.

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: va_grig@ssau.ru. Область научных интересов: испытание авиационных двигателей, начальное проектирование газотурбинных двигателей.

Радько Владислав Михайлович, кандидат технических наук, доцент ка-

федры 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.

PROBLEMS OF ULTRALOW POWER TURBINE DESIGN IN A TURBINE DRIVE SYSTEM

© 2014 D.S. Kalabuhov, V.A. Grigoryev, V.M. Rad'ko

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Ultralow power turbine drives (ULPTD) are used in the aerospace industry and in other sectors of the economy as source of energy for ancillary systems. At present, the actual task is improvement of their efficiency. One of the most promising areas for its increase is to optimize the parameters of turbine drive already in the early stages of design. The article discusses the design of optimal ultralow power turbine (ULPT), which is the main hub of ultralow power turbine drive. The basic problems of ultralow power turbine drive system optimization through a systemic approach to design. The problem of optimization is tasked as a problem of the conventional vector structural-parametric optimization. Methods and algorithms for its solution, justified criteria for ULPTD effectiveness evaluating, selected optimized parameters of axial and centrifugal turbines types are described. As the performance criteria is selected coefficient of performance (COP) of the turbine, its mass, the specific consumption of the working fluid, the cost of operating turbine drive. Expediency calculation mode selection in the optimization process of regime parameters evaluation criteria for generalized on ULPTD modes efficiency is grounded. Results on the effect of uncertainty on the value of project information criteria are given.

Ultralow power turbine, turbine drive, optimization, choice of parameters, settlement mode, the performance criteria, the uncertainty.

References

1. Podinovskii V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions of multiobjective problems]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2007. 256 p.
2. Trifonov A.G. Optimization Toolbox 2.2. Rukovodstvo pol'zovatelya [User manual]. Available at: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/-21.04.12.html.
3. Panchenko T.V. Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie / pod red. Yu.Yu. Tarasevicha [Genetic algorithms: a teaching manual / ed. by Yu.Yu. Tarasevich]. Astrakhan: Astrakhan University Publ., 2007. 87 p.
4. Gembicki F.W. Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices. Ph.D. Thesis, Case Western Reserve Univ. Cleveland, Ohio, 1974.
5. Maslov V.G., Kuz'michev V.S., Kovartsev A.N., Grigoriev V.A. Teoriya i metody nachal'nykh etapov proektirovaniya aviatsionnykh GTD: ucheb. posobie [Theory and methods of the GTE initial design stages]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1996. 147 p.

6. Izmailov A.F., Solodov M.V. Chislennye metody optimizatsii: uchebnoe posobie [Numerical optimization: a tutorial]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2005. 304 p.

7. Grigoriev V.A., Rad'ko V.M., Kalabuhov D.S. Selection and justification of criteria for evaluating of ultralow power turbine drive efficiency // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Problems and prospects of the engine production." Part 1. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2011. P. 42-43. (In Russ.)

8. Matveev V.N. The method of design calculation of multimode turbine drive based on centripetal turbines // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. Seriya: Problemy razvitiya dvigatelestroeniya. 1999. Iss. 3, part 2. P. 14-19. (In Russ.)

9. Grigoriev V.A., Rad'ko V.M., Kalabuhov D.S. Planning a factorial experiment for testing a single-stage ultralow power turbine // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 6(30). P. 81-91. (In Russ.)

About the authors

Kalabuhov Dmitry Sergeevich, junior researcher of SEC GDR, Samara State Aerospace University. E-mail: dskalabuhov@gmail.com. Area of Research: working processes in ultralow power turbines.

Grigoriev Vladimir Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), professor of the aircraft engines theory department, Samara State Aerospace University. E-mail:

va_grig@ssau.ru. Area of Research: the choice of parameters and design of small gas turbine engines.

Radko Vladislav Mikhailovich, Candidate of Science (Engineering), associate professor of the aircraft engines theory department, Samara State Aerospace University. E-mail: radko@ssau.ru. Area of Research: working processes in ultralow power turbines.