

УДК 621.438.001 2 (02)

**В.А. ГРИГОРЬЕВ, Д.С. КАЛАБУХОВ, В.М. РАДЬКО, Н.Ф. МУСАТКИН***Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. академика С.П. Королёва, Россия*

## **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБОПРИВОДОВ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

*Рассмотрена целесообразность и актуальность направлений исследований и разработок микротурбинных приводов (МТП), которые неразрывно связаны с проблемой повышения эффективности последних. Проанализированы определения, систематизирующие термины по турбоприводам малой мощности (ТПММ), обосновано применение термина «турбопривод сверхмалой мощности» (ТПСММ). Предложена классификация ТПСММ по различным признакам и сферам их применения. Показаны объективно низкие уровни эффективности ТПСММ и проанализированы пути ее повышения, которые связаны с проблемой выбора значений основных параметров турбопривода и, как следствие, с решением задачи синтеза облика рационального варианта ТПСММ. Обоснована целесообразность многокритериального подхода к решению задачи оптимизации ТПСММ.*

**Ключевые слова:** турбопривод сверхмалой мощности, микротурбина, эффективность, многокритериальная задача оптимизации, синтез облика, масса, технико-экономические характеристики.

### **Введение**

В Самарском государственном аэрокосмическом университете исследования в области рабочего процесса микротурбин (МТ) ведутся с 1958 года. В разнообразных технических устройствах они применяются в составе МТП, включающих помимо собственно МТ входные и выходные устройства.

Исследования по изучению газодинамики МТ и МТП проводятся в рамках научного направления микроэнергетики, становление которого связано с именем профессора В.М. Дорофеева.

Первые исследования были посвящены рабочему процессу центробежных турбин и созданию на их базе турбоприводов агрегатов летательных аппаратов. В дальнейшем область исследований была расширена на другие типы МТ: осевые, радиально-осевые и центробежные. Для этого было создано уникальное экспериментальное оборудование, которое применяется также и в учебном процессе для демонстрации рабочих процессов в турбинах.

По результатам проведенных исследований создавались и широко внедрялись МТП в составе различных турбоагрегатов.

**Целью данной статьи** является обоснование направлений дальнейших исследований и разработок МТ и МТП, которые в первую очередь неразрывно связаны с проблемой повышения их эффективности. В связи с этим в статье описывается современное состояние этой проблемы и возможные пути ее дальнейшего решения.

### **1. Классификация и сферы применения турбоприводов сверхмалой мощности**

Отметим, что в названии статьи фигурирует термин «турбопривод сверхмалой мощности», а не микротурбопривод или микротурбина. Существуют также понятия маломощной, малоразмерной, малорасходной турбины [1]. Все эти определения носят условный характер, однако во избежание различий в трактовании необходимо, путем обобщения информации, содержащейся в различной литературе, посвященной турбоприводам, сформулировать следующие понятия.

*Турбина малой мощности (маломощная турбина, малорасходная турбина)* – турбина для привода агрегатов, развивающая мощность на своем валу  $N \leq 300 \dots 500$  кВт, расход рабочего тела через которую составляет  $G \leq 2 \dots 3$  кг/с, а высота сопла (сопловой лопатки)  $h_c \leq 10$  мм при степени парциальности  $\varepsilon = 1$ .

*Микротурбина* – турбина малой мощности, в которой достигается мощность на валу  $N = 0,01 \dots 10$  кВт, расход рабочего тела составляет не более 0,1 кг/с, а высота сопла (сопловой лопатки)  $h_c \leq 5$  мм при степени парциальности  $\varepsilon = 1$ .

Остальные маломощные турбины целесообразно называть *малоразмерными турбинами*.

Таким образом, в классе турбин малой мощности (ТММ) выделяются два подкласса, которые довольно существенно различаются друг от друга по величинам некоторых конструктивных и режимных

параметров, а также по уровню максимально достигнутого КПД. В работе [1] отмечается, что при высоте лопатки  $h_c \leq 5$  мм происходит «обвальное» падение КПД. Высокие значения потерь в МТ обуславливаются низкими значениями числа Рейнольдса  $Re < 10^5$ , малой относительной длиной лопаток  $\bar{h}_c = h_c / D_{cp} < 0,05$ , большими относительными величинами толщин кромок, зазоров и шероховатостей.

Термин «микротурбина», являясь зарегистрированной торговой маркой американской компании Capstone Turbine Corporation [2], которая производит автономные энергетические установки (ЭУ) малой мощности для привода электрогенераторов, зачастую дополняется термином «микротурбинный привод». Поэтому во избежание недоразумений предлагается вместо терминов «микротурбины» и «микротурбинный привод» использовать термины «турбина сверхмалой мощности» и «турбопривод сверхмалой мощности».

Отметим, что, несмотря на довольно большое число публикаций, посвященных исследованию ТПММ, только в [3] осуществлена попытка их классификации. В данной работе предлагается более наглядная классификация ТПММ по различным признакам в виде структурной схемы, изображенной на рис. 1. Видно, что ТПММ представляют собой ши-

рокий по своим основным данным класс турбин. При этом подкласс ТПСММ является более широким по сферам своего применения, чем малоразмерные агрегатные турбоприводы, что обусловлено очевидными особенностями первых: малыми габаритами и массой, а также большей потребностью многочисленных вспомогательных агрегатов различных отраслей промышленности именно в источниках энергии мощностью менее 10 кВт. Например, в аэрокосмической технике ТПСММ широко используются в турбогенераторах электрической энергии, турбонасосах систем топливопитания, автономных вентиляторов систем кондиционирования и жизнеобеспечения, центрифуг очистки топлива и масел, агрегатов бортовых навигационных систем (например, гироскопов) [4]. В промышленности используются ТПСММ в ручных пневмошлифовальных и режущих инструментах, в молекулярных высоковакуумных турбонасосах, в качестве турбодетандеров криогенных установок, во вспомогательных агрегатах автономных ЭУ. В медицине ТПСММ незаменимы в качестве двигателей стоматологических вращающихся инструментов, применяется в инструментах для костной хирургии и онкологии.

ТПСММ вне конкуренции там, где приводимые ими в действие машины или исполнительные органы требуют частот вращения  $n > 3,5 \cdot 10^4$  об/мин [4],

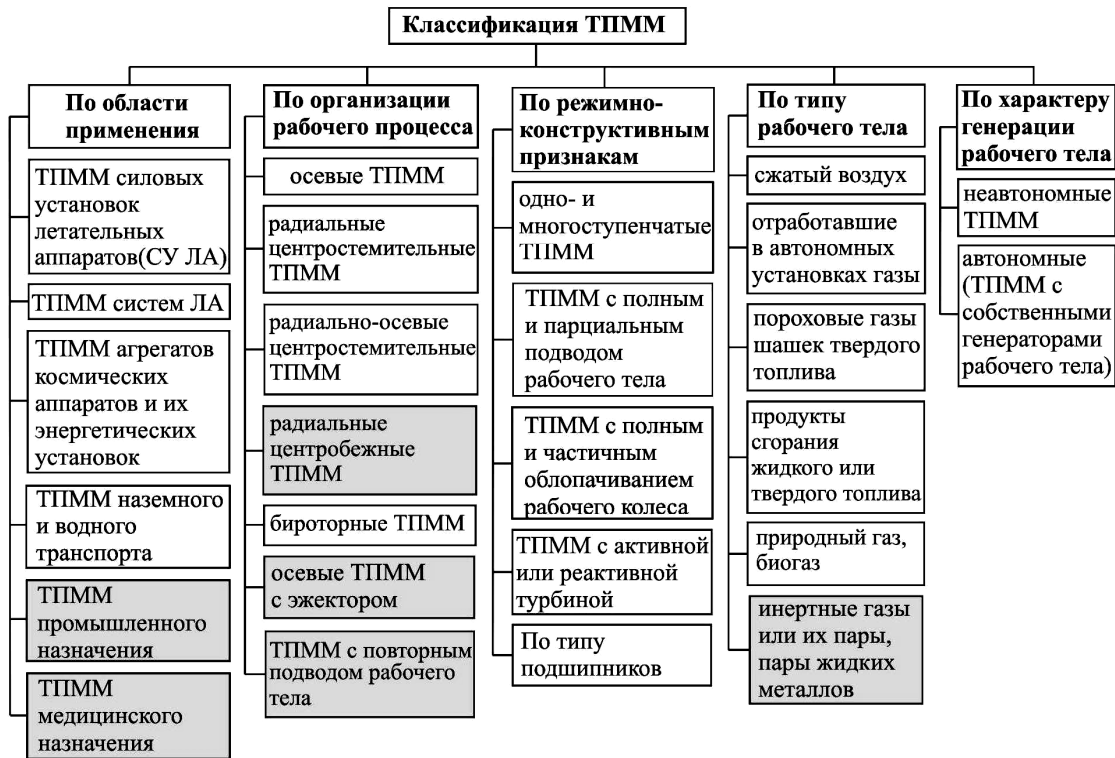


Рис. 1. Классификация турбоприводов малой мощности:  
 □ – для любых ТПММ; ◻ – применительно только к ТПСММ

на предприятиях, где недопустимо искрообразование (шахты, химическое производство взрывчатых веществ и др.), высокая надежность работы в условиях пыльной и влажной окружающей среды, и широких диапазонах температур. Достоинствами ТПСММ также является отсутствие абсолютной герметичности блока, в котором он находится, и весьма низкая, по сравнению с другими типами микроприводов, удельная масса. Главными недостатками являются:

- необходимость применения редукторов при высоких частотах вращения турбины и при потребной частоте вращения приводимого агрегата  $n < 10^4$  об/мин<sup>-1</sup>;
- невысокие максимально достигнутые уровни КПД ( $\eta_{г\text{ max}} = 0,6...0,65$ ) в современных эксплуатирующихся ТПСММ;
- высокий уровень шума, достигающий 95-130 дБ при отсутствии средств для его снижения.

Итак, из всего вышесказанного следует вывод, что ТПСММ, и в особенности ТПСММ, являются довольно востребованными устройствами в различных отраслях транспорта, производства, медицины, поэтому повышение их эффективности является важной проблемой.

## 2. Анализ проблемы повышения эффективности ТПСММ и пути ее решения

Эффективность турбопривода оценивается комплексом критериев, выбор которых обусловлен назначением привода. Эти критерии связаны с КПД, экономией рабочего тела, массой, габаритами стоимостью, ресурсом и другими показателями. Существует несколько направлений повышения эффективности ТММ и ТПСММ [3, 5, 6]:

- оптимизация геометрических и режимных параметров;
- определение областей целесообразного использования различных типов турбоприводов;
- совершенствование элементов проточной части, связанное с уменьшением потерь энергии;
- улучшение технологии производства, обеспечивающее требуемую геометрию проточной части и чистоту поверхностей.

Исследования по повышению эффективности ТСММ и ТПСММ были связаны в основном с экспериментальным изучением влияния различных конструктивных параметров на их экономичность и с совершенствованием проточной части для ее увеличения. Под экономичностью понимается КПД и удельный расход рабочего тела. Описаны и области рационального применения различных типов турбин, хотя и не достаточно полно и убедительно, из-

за отсутствия формализованной методологической базы выбора типа турбины при тех или иных исходных и выходных параметрах. Что касается вопросов оптимизации ТПСММ, то им в существующей литературе уделяется недостаточно внимания. Можно лишь отметить работы [4] и [5], в которых эти вопросы подробно рассматривались. По-видимому, такое положение дел определялось недостаточной изученностью рабочих процессов, протекающих в ТПСММ. Однако к нашему времени накоплено большое количество экспериментальных данных, составлены различные регрессионные зависимости мощностного КПД турбин (в основном, осевых и радиальных) от режимных и геометрических параметров, позволяющих вплотную заняться проблемами оптимизации параметров ТСММ.

Очевидно, что пути совершенствования турбоприводов связаны между собой единой задачей. В самом деле, оптимизация параметров турбоприводов связана в общем случае с достижением экстремумов разнородных критериев эффективностей, а рациональное решение выбирается из области компромиссов. Известно, что у различных типов турбин при одинаковых исходных данных значения выходных параметров, являющихся критериями их эффективности, будут различны. Поэтому, исходя из некоторых формализуемых и неформализуемых критериев (КПД, масса агрегата, стоимость его изготовления, удобство размещения турбины в агрегате, ресурс и т.д.) можно выбрать тип турбины с наилучшими значениями величин этих критериев.

Таким образом, повышение эффективности ТПСММ связано с решением задачи выбора основных параметров турбопривода и, как следствие, с решением задачи синтеза облика рационального варианта турбопривода. Под обликом понимается совокупность конструктивно-геометрических и режимных параметров, описывающих проектируемый турбопривод.

Отметим, что применительно к турбоприводам зачастую выполнялась лишь однокритериальная оптимизация, а в качестве критериев эффективности рассматривался внутренний КПД либо удельный расход рабочего тела. Однако если обратиться к опыту проектирования авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и их турбокомпрессоров на стадии начального проектирования [7], то там оценка проектных решений основана на многокритериальной оценке эффективности системы более высокого уровня – ЛА, что связано с наличием большого числа зачастую противоречивых требований, предъявляемых к проектируемой системе ЛА-ГТД, а также многоцелевым назначением последних. В этом случае для различных критериев эффективности оптимальные значения одних и тех же оптимизируемых

параметров могут весьма отличаться друг от друга (в 1,5...2 раза). В силу того, что применение турбоприводов, в том числе и неавтономных, также носит многоцелевой характер, то можно полагать, что в настоящее время следует решать задачу многокритериальной оптимизации ТПСММ.

В работе [4] впервые был дан метод оптимального расчета ЦС ТПСММ, включающего в себя входное устройство, турбину и выходное устройство. При этом выбор параметров осуществляется не по наибольшему КПД на одном расчетном режиме, а по наилучшему критерию энергетической эффективности, учитывающему многорежимность функционирования турбопривода. Исходной информацией к проектированию по этому методу являются нагрузка турбопривода (зависимости мощности  $N = f(\tau)$  и частоты вращения ротора  $n = f(\tau)$  от времени) и законы управления параметрами рабочего тела. Под законами управления параметрами рабочего тела понимаются изменения в процессе работы полных давления и температуры  $T_{вх}^*$  на входе в ЦС ТПСММ  $p_{вх}^*$ , статического давления на выходе из него  $p_{вых}$ . Нагрузку турбопривода и законы управления автор объединяет в функциональное ограничение. В качестве критерия энергетической эффективности используются аналоги удельного расхода рабочего тела  $(G/N)_{\Sigma}$ , удельной мощности  $(N/G)_{\Sigma}$  или мощностного КПД

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i L_{sТПi} \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i L_{sТПi} \eta_{ТПi} \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i L_{sТПi} \tau_i},$$

где  $N_i$  – мощность ТПСММ на  $i$ -м режиме;  
 $\tau_i$  – время работы ТПСММ на  $i$ -м режиме;  
 $G_i$  – расход рабочего тела на  $i$ -м режиме;  
 $L_{sТПi}$  – изоэнтальпическая работа ТПСММ на  $i$ -ом режиме;

$\eta_{ТПi}$  – мощностной КПД на  $i$ -м режиме.

Таким образом, на каждом  $i$ -м режиме вычисляется величина критерия энергетической эффективности в зависимости от различных геометрических, режимных и термодинамических параметров. Видно, что рассмотренная в [4] методика в целом справедлива и для других типов многорежимных ТПСММ, носит общий характер, а задача проектирования однорежимного ТПСММ будет являться частной. В дальнейшем можно будет не ограничиваться использованием выражений для мощностного КПД, удельного расхода и удельной мощности, а составить подобные выражения для определения оптимальных массовых и технико-экономических

показателей. Но есть и некоторые ограничения по дальнейшему использованию методики. Во-первых, задача многокритериальной оптимизации более сложная, чем однокритериальная, поэтому использование большого числа независимых переменных может привести к значительным погрешностям в расчете их оптимальных значений. Во-вторых, желательна наглядность решения задачи оптимизации, т.е. визуализация зависимости целевой функции от параметров оптимизации в виде графиков, поскольку для решения многокритериальной задачи оптимизации, по сути, важны не сами оптимальные значения параметров, а их рациональные значения. Рациональные значения параметров являются компромиссными и с допустимой степенью проигрыша в пределах диапазона возможных изменений проектных данных могут удовлетворять большинству предъявляемых к ТПСММ требованиям. Поэтому, независимые переменные желательно ограничивать числом не более трех.

## Заключение

Проблема повышения эффективности ТПСММ на этапе начального проектирования требует решения следующих задач:

1. Разработку системы критериев оценки эффективности на основании формализованных регрессионных зависимостей массовых, габаритных и технико-экономических показателей от оптимизируемых параметров многорежимных ТПСММ различного назначения с разными типами турбин.
2. Обоснование и выбор параметров, подлежащих оптимизации.
3. Создание системы математического моделирования, пригодной для решения оптимизационной задачи в многокритериальной постановке в условиях неопределенности исходных данных.

## Литература

1. Чехранов С.В. Особенности применения критериальных комплексов для выбора параметров малорасходных турбин / С.В. Чехранов // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань: КГТУ (КАИ), 2002. – № 1. – С. 73-75.
2. Capstone® Turbine Corporation [Электронный ресурс] / официальный интернет-сайт = microturbine.com. – 1997-2010. – Режим доступа: www.url:http://www.microturbine.com/. -31.12.2010.
3. Быков Н.Н. Выбор параметров и расчет маломощных турбин для привода агрегатов / Н.Н. Быков, О.Н. Емин. – М.: Машиностроение, 1972. – 228 с.
4. Матвеев В.Н. Особенности метода проектного расчета многорежимных центробежных микротурбинных приводов / В.Н. Матвеев //

*Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе (II): Тез. докл. Объединенной междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1999. – С. 353.*

5. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины: монография / А.С. Наталевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

6. Левенберг В.Д. Судовые турбоприводы: Справочник / В.Д. Левенберг. – Л.: Судостроение, 1983. – 328 с.

7. Маслов В.Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД / В.Г. Маслов. – М.: Машиностроение, 1981. – 123 с.

Поступила в редакцию 28.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, зам. главного конструктора А.А. Маркин, ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара, Россия.

## АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТУРБОПРИВОДІВ НАДМАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ І ШЛЯХИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

*В.О. Григор'єв, Д.С. Калабухов, В.М. Радько, М.Ф. Мусаткин*

Розглянута доцільність і актуальність напрямів досліджень і розробок микротурбінних приводів (МТП), які нерозривно пов'язані з проблемою підвищення ефективності останніх. Проаналізовані визначення, що систематизують терміни по турбоприводах малої потужності (ТПМП), обґрунтовано застосування терміну «турбопривід надмалої потужності» (ТПНМП). Запропонована класифікація ТПНМП за різними ознаками і сферами їх вживання. Показані об'єктивно низькі рівні ефективності ТПСМП і проаналізовані шляхи її підвищення, які пов'язані з проблемою вибору значень основних параметрів турбоприводу і, як наслідок, з рішенням задачі синтезу обліку раціонального варіанту ТПНМП. Обґрунтована доцільність багатокритеріального підходу до рішення задачі оптимізації ТПНМП.

**Ключові слова:** турбопривід надмалої потужності, микротурбіна, ефективність, багатокритеріальне завдання оптимізації, синтез обліку, маса, техніко-економічні характеристики.

## THE ANALYSIS OF THE PROBLEM OF INCREASE OF EFFICIENCY TURBO DRIVE OF MIDGET POWER CONDITION AND THE WAY OF ITS DECISION

*V.A. Grigoriev, D.S. Kalabuhov, V.M.Rad'ko, N.F. Musatkin*

Expedience and actuality of directions of research and-developments microturbine drives (MTD) which are indissolubly related to the problem of increase of efficiency of the last is considered. Determinations, systematizing terms on the turbo drives of low power (TDLP), are analyzed, application of term «turbo drive of midget power» (TDMP) is grounded. Classification of TDMP on different signs and spheres of their application is offered. The low levels of efficiency of TDMP are rotined objectively and ways of its increases are analyzed, which are related to the problem of choice of values of turbo drive basic parameters and, as a result, with the decision of task of appearance synthesis of TDMP rational option. Multicriterion approach to the decision of optimization problem of the TDMP.

**Key words:** turbo drive of midget power, the microturbine, efficiency, multicriterion optimization, synthesis of appearance, weight, technical and economic characteristics.

**Григор'єв Владимир Алексеевич** – д-р техн. наук, професор кафедри теорії двигателе летательних апаратів Самарського державного аерокосмічного університета ім. академіка С.П. Королева, Самара, Росія.

**Калабухов Дмитрий Сергеевич** – аспірант кафедри теорії двигателе летательних апаратів Самарського державного аерокосмічного університета ім. академіка С.П. Королева, Самара, Росія, e-mail: stream\_dk@mail.ru.

**Радько Владислав Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедри теорії двигателе летательних апаратів Самарського державного аерокосмічного університета ім. академіка С.П. Королева, Самара, Росія, e-mail: radko@ssau.ru.

**Мусаткин Николай Федорович** – канд. техн. наук, професор кафедри теорії двигателе летательних апаратів Самарського державного аерокосмічного університета ім. академіка С.П. Королева, Самара, Росія.