

МЕТОД ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА МНОГОРЕЖИМНЫХ ТУРБОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ МИКРОТУРБИН

Матвеев В.Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

На борту современных летательных аппаратов нашли применение маломощные ($N=0,01...10$ кВт) малоразмерные ($D=10...100$ мм) быстроходные ($n = (5...100) \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$) центростремительные микротурбины (ЦСМТ). В технических устройствах они применяются в составе турбоприводов, включающих помимо непосредственно ЦСМТ входные и выходные устройства.

Применение центростремительных микротурбинных приводов (ЦСМТП) на борту летательных аппаратов предъявляет к ним в первую очередь требование высокой энергетической эффективности. К сожалению, величина КПД ЦСМТП до сих пор невелика и не превышает 50...55 %, а иногда, в силу многорежимного характера работы и комплекса конструктивных и технологических ограничений, снижается до 10...15 %.

На обеспечение повышенной энергетической эффективности направлены все известные методы проектного расчета турбоприводов [1,2]. Однако, в настоящее время распространено проектирование ЦСМТП без учета взаимосвязи процессов, происходящих во входном и выходном устройствах, с рабочим процессом ЦСМТ. Проектирование ЦСМТ производится с ориентацией на получение наибольшего мощностного КПД только на одном расчетном режиме. Из-за отсутствия достаточного экспериментального материала удается учесть влияние не более пяти параметров на КПД ЦСМТ.

В разработанном методе проектного расчета ЦСМТП учтены отмеченные недостатки. В качестве цели расчета выбрано формирование проточной части, обеспечивающей не просто заданную мощность на расчетном режиме, а заданный график нагрузки при принятом законе регулирования параметров рабочего тела турбопривода и наилучшее значение критерия энергетической эффективности. При этом обеспечиваются ограничения режимного, конструктивного, технологического и эксплуатационного характера.

Исходной информацией при расчете по данному методу являются:

- график нагрузки;
- закон регулирования параметров рабочего тела турбопривода.

График нагрузки может быть задан в двух вариантах: либо в виде

зависимостей мощности и частоты вращения от времени $N=f(\tau)$ и $n=f(\tau)$, ибо в виде зависимостей крутящего момента и частоты вращения от времени $M_{кр} = f(\tau)$ и $n=f(\tau)$.

Под законами регулирования параметров рабочего тела турбопривода понимаются закономерности изменения в процессе работы полных давления $p_{вх}^*$ и температуры $T_{вх}^*$ на входе в ЦСМТП, а также статического давления $p_{вых}$ на выходе из турбопривода.

Заданные графики нагрузки и законы регулирования параметров $p_{вх}^*$, $T_{вх}^*$ и $p_{вых}$ можно объединить как условие функционального ограничения.

В роли режимных и конструктивных ограничений обычно выступают:

- характерные для микротурбинных приводов границы режимных параметров;
- ограничения по диаметральным и осевым габаритам;
- границы диапазонов исследованных конструктивных параметров.

С технологической и эксплуатационной точек зрения недопустимы назначения:

толщины выходных кромок сопловых и рабочих лопаток меньше 0,3 мм, так как в противном случае при производстве не избежать большого процента бракованных лопаточных венцов, а при эксплуатации - интенсивной эрозии выходных кромок;

- горла межлопаточных каналов меньше $a_r = 1,0 \dots 1,5$ мм из-за существенного увеличения трудоемкости и вероятности появления бракованных ЛВ;

- радиального и осевого зазоров меньше $\delta = 0,25 \dots 0,30$ мм вследствие задевания РК о статор при работе турбопривода.

В качестве критерия энергетической эффективности многорежимных ЦСМТП целесообразно использовать аналог мощностного КПД

$$\eta_{\&} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i L_{СТП} \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i L_{СТП} \eta_{ТМ} \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i L_{СТП} \tau_i},$$

где на любом i -ом режиме:

N_i - мощность турбопривода;

G_i - расход рабочего тела;

τ_i - время работы;

$$L_{СТП} = \frac{k}{k-1} RT_{oxi}^* \left[1 - \left(p_{вых} / p_{oxi}^* \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \text{изоэнтроническая работа}$$

ЦСМТП;

$\eta_{ТП} = N_i / (G_i L_{СТП})$ - мощностной КПД турбопривода;

Критерий $\eta_{\&}$ оценивает эффективность преобразования располагаемой работы рабочего тела в работу на валу турбопривода.

В отдельных случаях можно использовать менее общие критериальные параметры для оценки энергетической эффективности турбопривода. Так, если требуется оценить эффективность использования рабочего тела, запасенного, например, на борту летательного аппарата, то можно воспользоваться аналогом удельной мощности

$$\bar{N}_{\&} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i L_{СТП} \eta_{ТП} \tau_i}{\sum_{i=1}^n G_i \tau_i}$$

или аналогом удельного расхода $\bar{G}_{\&} = 1 / \bar{N}_{\&}$.

Метод расчета и проектирования ЦСМТП базируется на решении задачи оптимизации. В зависимости от назначений и условий функционирования многорежимного ЦСМТП в качестве критерия оптимальности (функции цели) выбирается один из критериев энергетической эффективности $\eta_{\&}$, $\bar{N}_{\&}$ или $\bar{G}_{\&}$. При решении задач оптимизации соблюдаются указанные выше ограничения функционального, режимного, конструктивного, технологического и эксплуатационного характера, которые разделяют число варьируемых параметров оптимизации на зависимые и независимые переменные.

На первом этапе расчета проводится анализ графика нагрузки и законов регулирования параметров турбопривода. На основании этого анализа весь период функционирования разбивается на конечное число k режимов (см. рис. 1), на протяжении которых величины N ($M_{кр}$), $p^*_{вх}$, $T^*_{вх}$, $p_{вых}$ и частоты вращения n можно считать неизменными.

В дальнейшем в качестве расчетного выбирается первый режим работы. На нем решается оптимизационная задача по определению геометрических параметров ЦСМТП, обеспечивающих наибольшее значение мощностного КПД $\eta_{ТП}$. После этого вычисляются комплексы $G_1 L_{СТП} \eta_{ТП} \tau_1$; $G_1 L_{СТП} \tau_1$; $G_1 \tau_1$ (см. рис. 2). На всех других $(k-1)$ режимах работы при найденных и зафиксированных величинах геометрических параметров определяются те же комплексы $G_i L_{СТП} \eta_{ТП} \tau_i$; $G_i L_{СТП} \tau_i$; $G_i \tau_i$ и вычисляется один из выбранных критериальных параметров $\eta_{\&}$, $\bar{N}_{\&}$ или $\bar{G}_{\&}$.

Далее за расчетный принимается второй режим работы турбопривода и по описанной выше схеме опять находятся величины геометрических параметров, соответствующие наилучшему значению выбран-

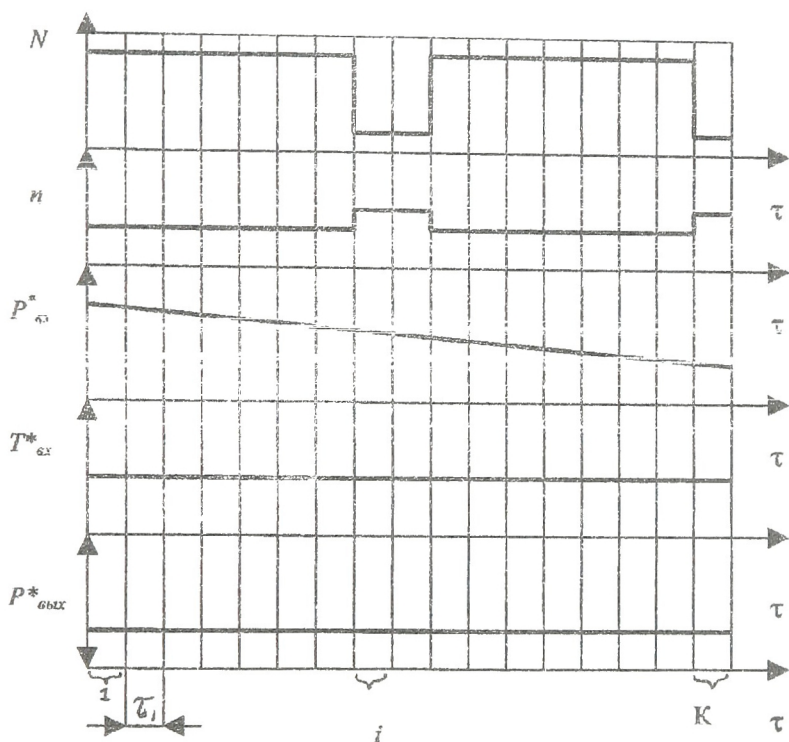


Рисунок 1 - Разбиение периода функционирования на конечное число режимов с постоянными значениями N , n , $P^*_{вх}$, $T^*_{вх}$ и $P^*_{вых}$

ного критерия энергетической эффективности. Таким образом перебираются все k режимов, из которых состоит весь период функционирования турбопривода, и для каждого фиксированного расчетного режима вычисляется величина критерия энергетической эффективности.

При этом каждой величине критерия энергетической эффективности соответствует своя комбинация значений варьируемых зависимых и независимых параметров оптимизации ЦСМТП. Совокупность значений каждого независимого параметра оптимизации позволяет получить диапазон его изменения в расчете конкретного ЦСМТП. На основании анализа полученных таким образом диапазонов составляется еще m дополнительных комбинаций сочетаний значений независимых параметров. Для них также рассчитываются (см. рис. 2) значения выбранного критерия энергетической эффективности.

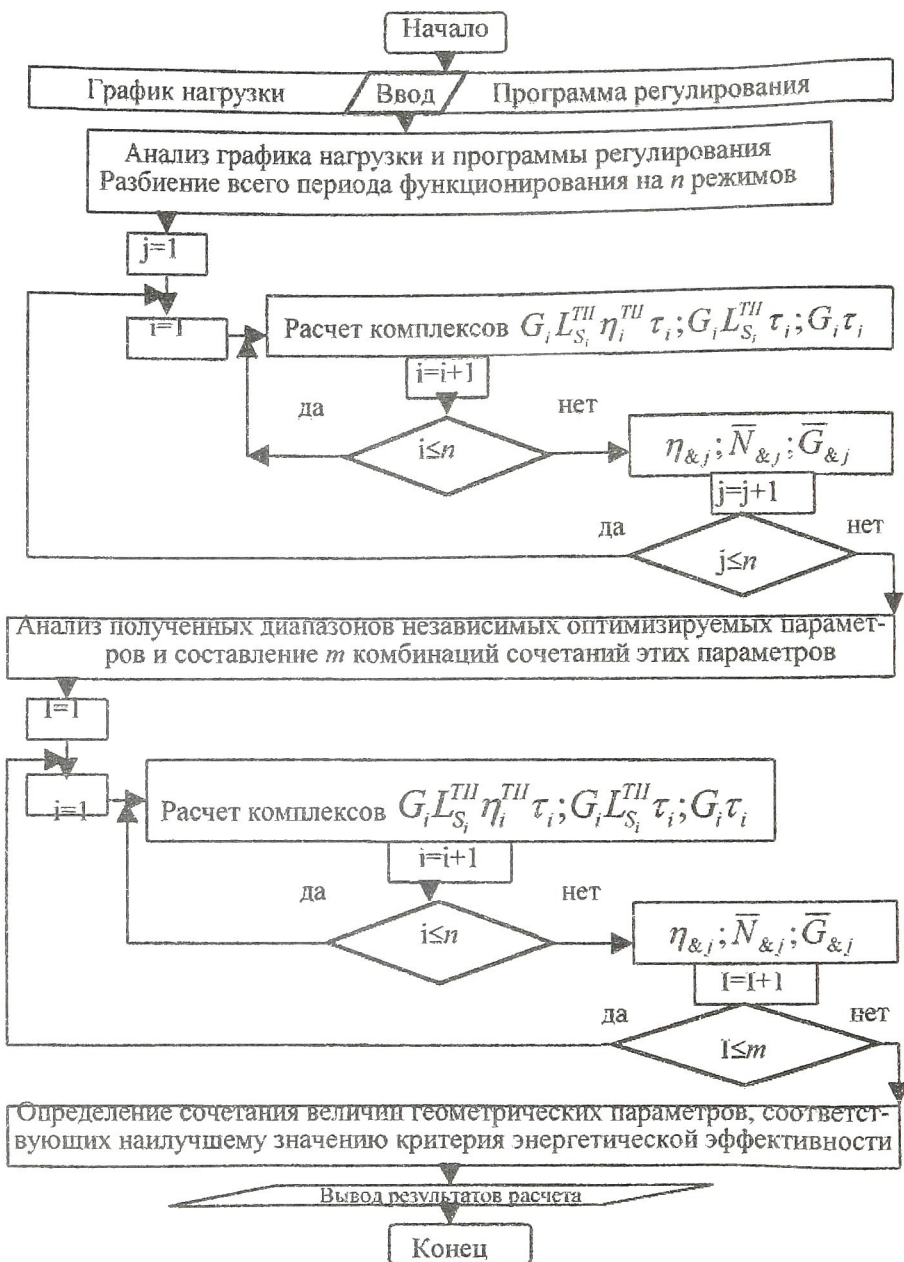


Рисунок 2 – Схема алгоритма расчета многорежимного ЦСМТП

Наилучшее из $(k + m)$ значений критерия энергетической эффективности определяет искомое сочетание величин геометрических параметров турбопривода.

В описанном методе его ядро составляет расчет комплексов $GL_{STПП} \eta_{ПТ}$, $GL_{STПТ}$ и Gt как на некотором i -ом режиме, который принят в качестве расчетного, так и на нерасчетных режимах.

В этих комплексах τ определяется при разделении графика нагрузки на k режимов, а $L_{STП}$ для конкретного рабочего тела находится по известным значениям $p_{вх}$, $T_{вх}$ и $p_{вых}$. Поэтому интересующие комплексы можно считать определенными, если найдены мощностной кпд турбопривода и расход рабочего тела как на расчетных, так и на нерасчетных режимах. В принципе значения указанных параметров могут быть оценены по методикам [1] и [2]. Однако автором настоящего метода предложена своя методика вычисления $\eta_{ПТ}$ и Q_b , опубликованная в настоящем сборнике. Ее отличие заключается в том, что рабочий процесс ЦСМТ рассматривается совместно с процессами течения газа во входном и выходном устройствах. При этом используются математические модели:

- потока во входном устройстве;
- выбора геометрических параметров ЦСМТ, аналогичная приведенной в работе [1], но расширенная до 24 переменных;
- двухмерного потока ЦСМТ;
- потока в выходном устройстве ЦСМТП [3].

В заключение следует отметить, что апробация разработанного метода показала, что расхождение расчетных и измеренных значений мощности, удельной мощности и кпд не превышает соответственно 3,0; 5,0 и 5,5 %. А с помощью численного эксперимента установлено, что учет многорежимности функционирования ЦСМТП в отдельных случаях позволяет снизить расход рабочего тела до 7...10 %.

Список литературы

1. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. - М.: Машиностроение, 1979. - 192 с.
2. Тихонов Н.Т. Экспериментальное исследование влияния парциальности и высоты лопаток на работу воздушной центростремительной микротурбины // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1963 - №4. - С. 139 - 149.
2. Матвеев В.Н. Математическая модель потока на выходе из рабочего колеса центростремительной микротурбины // Доклады Междунар. научно - техн. конф. Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе/ Самарск. госуниверситет. аэрокосмич. ун-т. -1997. - Часть I. - С. 99 - 104.