

УДК 621.54

**О.В. ВЕДЕРНИКОВ, Р.А. ШЕВЧЕНКО, А.А. ШТЫКОВ***ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО ЗНАЧЕНИЯ МОЩНОСТИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТВаД СО СВОБОДНОЙ ТУРБИНОЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

*Рассмотрена возможность обеспечения максимального значения мощности ТВаД в условиях высоких температур окружающего воздуха путем использования закона регулирования с косвенным определением (пересчетом через измеряемые параметры) полной температуры газа перед турбиной компрессора. Определена целесообразность и сфера применения данного закона регулирования. Описана использованная на практике методика расчета параметров косвенного определения температуры газа перед турбиной компрессора через измеряемые параметры для одного из ТВаД, разрабатываемого на ОАО «Мотор Сич».*

**Ключевые слова:** турбовальный двигатель, высокая температура наружного воздуха, мощность, температура газа, закон регулирования, косвенное определение.

### Введение

В настоящее время одной из задач, которые стоят перед разработчиками ТВаД, является обеспечения максимально возможного значения мощности в условиях высоких температур наружного воздуха.

Актуальность этой задачи обусловлена эксплуатацией вертолетов одной модели при температурах окружающего воздуха  $t_n$  от минимальной арктической до максимальной тропической.

Для согласования работы вертолета и двигателя в широком диапазоне климатических условий возникает необходимость установки более мощного ТВаД, обеспечивающего потребное значение мощности на выводном валу  $N_B$  при высоких температурах наружного воздуха. Однако, чрезмерное переразмеривание двигателя приводит к увеличению его массы и удельного расхода топлива на режимах пониженной мощности. В связи с этим, у ТВаД при низких  $t_n$  поддерживается заданный уровень мощности, а при высоких температурах наружного воздуха – определенный уровень параметров рабочего цикла двигателя, обеспечивающий необходимый ресурс.

В данной статье рассмотрен способ обеспечения максимально возможного значения мощности малоразмерного ТВаД при условии обеспечения заданного уровня ресурса его основных деталей.

### 1. Влияние закона регулирования на основные параметры ТВаД

ТВаД имеет три основных регулируемых параметра: мощность на выводном валу  $N_B$ , частота вра-

щения ротора турбокомпрессора  $n_{TK}$  и полная температура газа перед турбиной компрессора  $T_{Г}^*$ . Кроме того, от частоты вращения напрямую зависят напряжения, возникающие в деталях ротора турбокомпрессора, а от полной температуры газа перед турбиной компрессора – температуры элементов двигателя, влияющие на их механические свойства ( $\sigma_T$ ,  $E$ ) и на внутренние напряжения в них. Таким образом,  $n_{TK}$  и  $T_{Г}^*$  являются эффективными средствами контроля и ограничения величин, во многом определяющих надежность и ресурс основных деталей двигателя.

Выбор предельно допустимых значений  $n_{TK}$  и  $T_{Г}^*$  выполняется из условия обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик двигателя в составе вертолета и обеспечения заданного ресурса основных деталей.

На этапе определения основных параметров рабочего цикла двигателя задается максимальное значение температуры окружающего воздуха  $t_{n\text{огр}}$ , до которого следует поддерживать мощность. При этом мощность на выводном валу при низких температурах наружного воздуха поддерживается постоянной за счет уменьшения расхода топлива (дросселирования). С ростом температуры окружающего воздуха начиная с заданного значения  $t_{n\text{огр}}$  мощность снижается, а постоянным поддерживается значение одного из регулируемых параметров ( $n_{TK}$  или  $T_{Г}^*$ ), который в данных климатических условиях является лимитирующим.

Частота вращения ротора турбокомпрессора может быть достаточно просто и точно замерена, поэтому ее регулирование легко реализовать.

Установка датчиков полной температуры газа перед турбиной компрессора нежелательна вследствие некоторого снижения ее к.п.д. из-за их влияния, а также из-за небольшого ресурса их работы в высокотемпературной окислительной среде.

В некоторых ТВаД класса мощности 1500...2500 л.с. возможна установка термпар за турбиной компрессора. В этом случае регулируемым параметром вместо  $T_{\Gamma}^*$  становится полная температура газа за турбиной компрессора  $T_{\text{ТК}}^*$ .

В малоразмерных высокотемпературных ТВаД практически исключена возможность установки термпар за турбиной компрессора, поэтому их устанавливают за свободной турбиной. Таким образом, регулируемым параметром становится именно полная температура газа за свободной турбиной  $T_{\text{СТ}}^*$ . При работе двигателя с законом регулирования  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  с увеличением температуры наружного воздуха  $t_{\text{Н}}$  и отборов воздуха на нужды вертолета  $G_{\text{ОТБ}}$  резко изменяется значение срабатываемого на турбине теплоперепада. Таким образом, при  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  значение  $T_{\Gamma}^*$  снижается, что приводит к резкому падению мощности на выводном валу двигателя.

Для количественной оценки снижения мощности при использовании закона регулирования  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  по сравнению с  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$  использована математическая модель одного из разрабатываемых на ОАО «Мотор Сич» ТВаД.

Данная математическая модель разработана на основании экспериментальных характеристик узлов и идентифицирована по результатам испытаний.

В рассматриваемом двигателе замер температуры газа производится за свободной турбиной.

При расчете климатических характеристик параметры двигателя определены как без отборов воздуха на нужды вертолета, так и с учетом данных отборов. Это связано с тем, что увеличение величины отбора воздуха на нужды вертолета приводит к существенному повышению температуры газа.

Климатические характеристики рассматриваемого ТВаД определены в условиях  $H = 0, M = 0$ . При работе двигателя без отборов воздуха на нужды вертолета заданное значение мощности на выводном валу поддерживается до  $t_{\text{Н}} = +35^{\circ}\text{C}$ . Свыше данной температуры окружающего воздуха, а также при расчете параметров двигателя с учетом отбора воздуха ( $G_{\text{ОТБ}} = 5\%$ ) обеспечивается не превышение максимально допустимых значений  $n_{\text{ТК}}$  и  $T_{\Gamma}^*$ .

Рассмотрено два случая ограничения полной температуры газа перед турбиной компрессора. В первом случае в качестве закона регулирования используется закон  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$ . В качестве максимально допустимого значения  $T_{\text{СТ}}^*$  принята величина температуры газа за свободной турбиной при  $t_{\text{Н}} = +35^{\circ}\text{C}$  (в случае определения параметров дви-

гателя без отборов воздуха на нужды вертолета).

Во втором случае, в качестве закона регулирования выбран  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$ , т.е. тот закон регулирования, который, обеспечил бы получение максимальное значение мощности на выводном валу.

Климатические характеристики рассматриваемого ТВаД с описанными выше законами регулирования представлены на рис. 1.

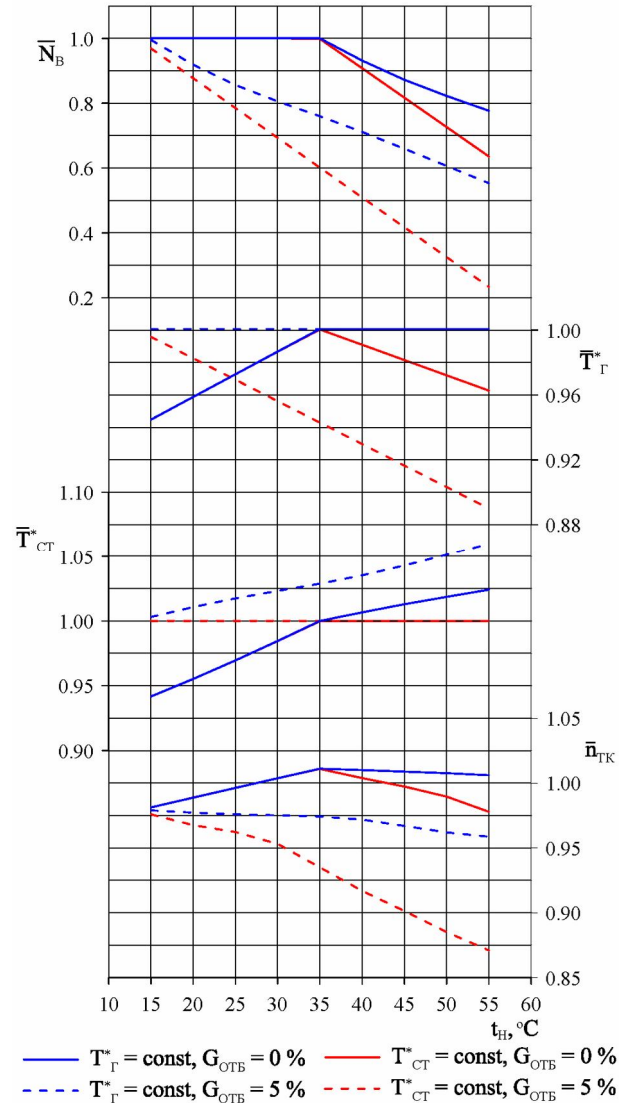


Рис. 1. Климатические характеристики ТВаД с законами регулирования  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$  и  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$

Из рис. 1 видно, что при  $t_{\text{Н}} = +55^{\circ}\text{C}$  при работе двигателя с поддержанием  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$  мощность составляет 78 % от заданного значения, а при  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  – 64 %. При работе двигателя с отбором воздуха на нужды вертолета ( $G_{\text{ОТБ}} = 5\%$ ) при  $t_{\text{Н}} = +55^{\circ}\text{C}$  мощность на выводном валу составляет 56 % и 23 % (от заданного значения) при  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$  и  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  соответственно.

Таким образом, использование закона регулирования  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  по сравнению с законом

$T_{\Gamma}^* = \text{const}$  приводит к снижению мощности на 14 % при работе двигателя без отбора воздуха на нужды вертолета и на 33 % при  $G_{\text{отб}} = 5\%$ .

Полученные данные показывают, что в случае замера температуры газа за свободной турбиной ТВаД применять закон регулирования  $T_{\text{СТ}}^* = \text{const}$  не целесообразно, так как в условиях высоких температур наружного воздуха данный закон регулирования приводит к значительному снижению мощности по сравнению с той величиной, которую можно было бы обеспечить из условия непревышения максимально допустимых величин  $n_{\text{ТК}}$  и  $T_{\Gamma}^*$ .

В данном случае предлагается использовать закон регулирования  $T_{\Gamma \text{ КОС}}^* = \text{const}$ , где  $T_{\Gamma \text{ КОС}}^*$  – определенная косвенным методом (пересчитанная по замеренным параметрам) температура газа перед турбиной компрессора. Значение  $T_{\Gamma \text{ КОС}}^*$  определяется в виде функции:

$$T_{\Gamma \text{ КОС}}^* = f(T_{\text{СТ}}^*; n_{\text{ТК}}; t_{\text{вх}}^*; P_{\text{вх}}^*; k_{\text{ЭКЗ}}), \quad (1)$$

где  $T_{\text{СТ}}^*$  – температура газа за свободной турбиной;  $n_{\text{ТК}}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора;  $t_{\text{вх}}^*$  – температура воздуха на входе в двигатель;  $P_{\text{вх}}^*$  – давление воздуха на входе в двигатель;  $k_{\text{ЭКЗ}}$  – коэффициент, учитывающий отклонение параметров конкретного экземпляра двигателя от параметров среднестатистического двигателя (межэкземплярный разброс).

## 2. Методика расчета параметров косвенного определения $T_{\Gamma \text{ КОС}}^*$

Для определения параметров пересчета  $T_{\Gamma}^*$  через измеряемые параметры зависимость (1) представлена в виде функции:

$$T_{\Gamma \text{ КОС}}^* = k_{\text{Р}} \times k_{\text{нт}} \times k_{\text{ЭКЗ}} \times T_{\text{СТ}}^*, \quad (2)$$

где  $k_{\text{Р}}$  – коэффициент, учитывающий влияние полного давления на входе в двигатель;  $k_{\text{нт}}$  – коэффициент, учитывающий влияние частоты вращения ротора турбокомпрессора и температуры воздуха на входе в двигатель;  $k_{\text{ЭКЗ}}$  – коэффициент, учитывающий отклонение параметров конкретного экземпляра двигателя от параметров среднестатистического двигателя;  $T_{\text{СТ}}^*$  – температура газов за свободной турбиной (замеренная штатным коллектором термопар).

### 2.1. Определение коэффициента $k_{\text{Р}}$

Характерной особенностью рассматриваемого ТВаД является боковой (по отношению к направлению полета) вход воздуха. Таким образом, в данной компоновке отсутствует влияние скоростного напора и, следовательно, полное давление на входе в двигатель в любых условиях полета будет равно атмосферному давлению.

Для определения коэффициента, учитывающе-

го влияния полного давления на входе произведены расчеты параметров двигателя при постоянной  $T_{\Gamma}^*$  для различных высот полета (полных давлений воздуха на входе в двигатель) и температур наружного воздуха.

Для оценки влияния полного давления воздуха на входе в двигатель на зависимость  $T_{\Gamma}^*$  от  $T_{\text{СТ}}^*$  определен коэффициент:

$$k_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{СТ}}^*}, \quad (3)$$

где  $T_{\Gamma}^*$  – температура газа перед турбиной компрессора;  $T_{\text{СТ}}^*$  – температура газа за свободной турбиной.

Зависимость данного коэффициента от температуры наружного воздуха для различных высот полета представлена на рис. 2.

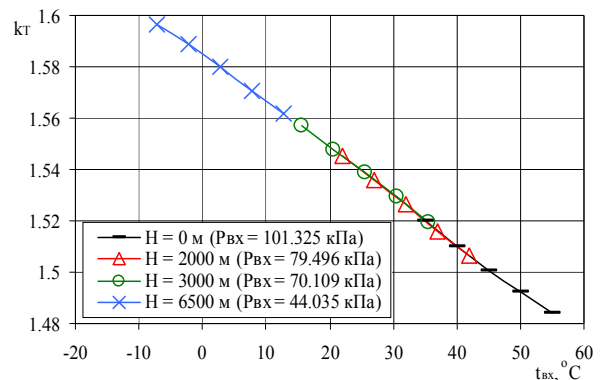


Рис. 2. Зависимость  $k_{\Gamma}$  от температуры наружного воздуха для различных высот полета

Из рис. 2 видно, что для различных высот полета при одной и той же температуре наружного воздуха значение коэффициента  $k_{\Gamma}$  будет одинаковым, т.е. для рассматриваемого двигателя коэффициент, учитывающий влияние давления полного давления на входе в двигатель  $k_{\text{Р}}$  будет равным 1.

### 2.2. Определение коэффициента $k_{\text{нт}}$

Для определения коэффициента  $k_{\text{нт}}$  произведены расчеты параметров двигателя на режимах работы в диапазоне частот вращения ротора турбокомпрессора от режима установленной 2.5-минутной мощности до крейсерского режима при температуре воздуха на входе в двигатель от +15 до +55 °С.

Для оценки влияния температуры воздуха на входе в двигатель и частоты вращения ротора турбокомпрессора на зависимость  $T_{\Gamma}^*$  от  $T_{\text{СТ}}^*$  использован коэффициент  $k_{\Gamma}$ , определенный по формуле (3).

Зависимость данного коэффициента от частоты вращения ротора турбокомпрессора для различных значений температуры воздуха на входе в двигатель представлена на рис. 3.

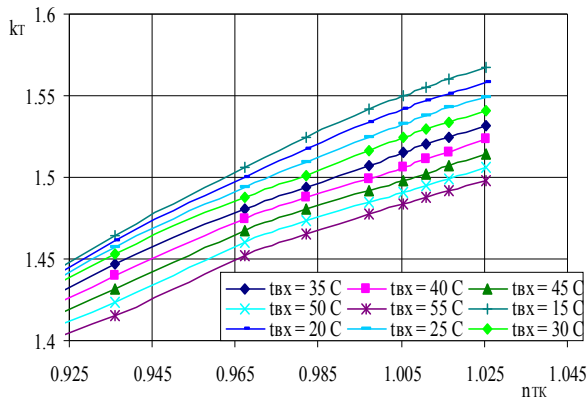


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $k_T$  от температуры воздуха на входе в двигатель и частоты вращения ротора турбокомпрессора

В результате аппроксимации графика, показанного на рис. 3, получена зависимость

$$k_{nt} = \frac{1}{a_1 \cdot n_{TK}^2 + a_2 \cdot n_{TK} + a_3 \cdot (t_{BX}^* + a_4) + a_5}, \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – числовые коэффициенты;  $n_{TK}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора;  $t_{BX}^*$  – температура воздуха на входе в двигатель.

### 2.3 Определение коэффициента $k_{экз}$

Коэффициент  $k_{экз}$  учитывает отклонение параметров конкретного экземпляра от параметров среднестатистического двигателя. Данный коэффициент определяется для каждого экземпляра двигателя в ходе приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) по специальной методике. Для дальнейших расчетов в данной статье  $k_{экз}$  принят равным 1.

### 3. Сравнение применения законов регулирования $T_{CT}^* = const$ и $T_{ГКОС}^* = const$

Штатные замеры параметров двигателя идентичны при использовании законов регулирования  $T_{CT}^* = const$  и  $T_{ГКОС}^* = const$ .

Для определения поправочного коэффициента  $k_{экз}$  при использовании закона регулирования  $T_{ГКОС}^* = const$  для каждого экземпляра двигателя потребуются дополнительные замеры параметров воздуха по тракту двигателя на этапе ПСИ.

Полученная зависимость определения  $T_{ГКОС}^*$  достаточно проста, поэтому усложнения и снижения быстродействия алгоритмов работы системы автоматического управления не потребуются.

На рис. 4 представлена климатическая характеристика, построенная для оценки результатов перехода с закона регулирования  $T_{CT}^* = const$  на  $T_{ГКОС}^* = const$ .

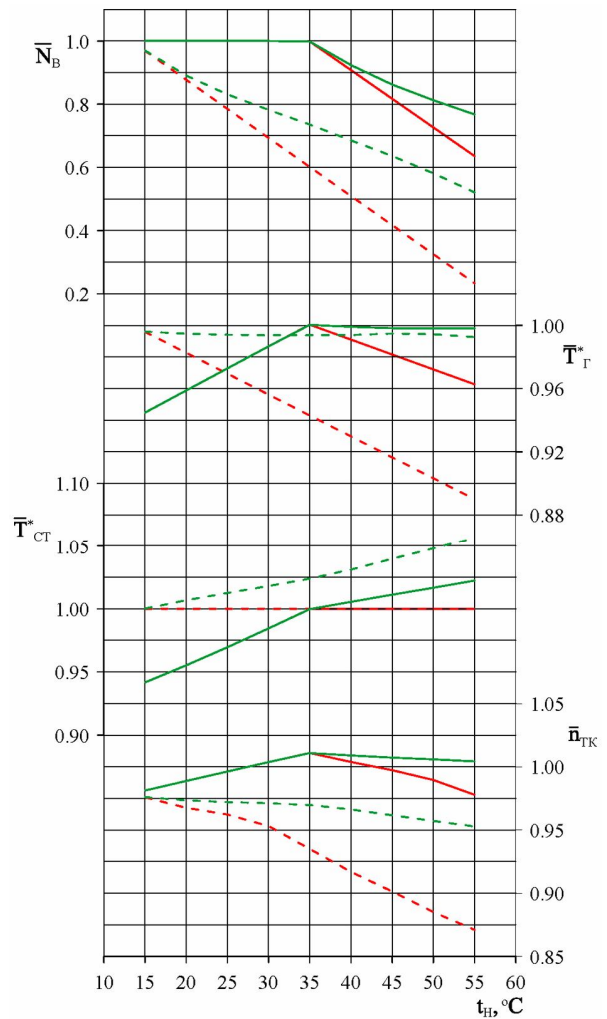


Рис. 4. Климатические характеристики ТВаД с законами регулирования  $T_{ГКОС}^* = const$  и  $T_{CT}^* = const$

Из рис. 4 видно, что по сравнению с применением закона регулирования  $T_{CT}^* = const$  в случае поддержания  $T_{ГКОС}^* = const$  заметно существенное увеличение мощности на выводном валу двигателя в условиях высоких температур наружного воздуха (особенно при работе двигателя с отборами воздуха на нужды вертолета). При  $t_n = +55$  °C мощность увеличилась с 64 % до 76 % и с 23 % до 52 % при  $G_{OTB} = 0$  % и  $G_{OTB} = 5$  % соответственно.

Полученные значения мощности близки к максимально возможным величинам при использовании закона регулирования  $T_{Г}^* = const$  (78 % и 56 % при  $G_{OTB} = 0$  % и  $G_{OTB} = 5$  % соответственно). Некоторое снижение объясняется тем, что в при поддержании  $T_{ГКОС}^* = const$  действительное значение полной температуры газа перед турбиной компрессора  $T_{Г}^*$  несколько ниже максимально допустимого значения. Это объясняется неизбежной погрешностью в ходе аппроксимации при определении коэффициента  $k_{nt}$ .

## Выводы

Применение предлагаемого закона регулирования  $T_{ГКОС}^* = \text{const}$  по сравнению с  $T_{СТ}^* = \text{const}$  для рассматриваемого турбовального двигателя позволяет без конструктивных изменений значительно повысить величину мощности на выводном валу двигателя в условиях высоких температур наружного воздуха.

Получена корректная и достаточно простая зависимость  $T_{ГКОС}^*$  от измеряемых параметров, легко реализуемая в САУ двигателя.

## Заключение

Для малоразмерных ТВаД с замером температуры газа за свободной турбиной, вместо закона

регулирования

$$T_{СТ}^* = \text{const}$$

целесообразно применять закон регулирования

$$T_{ГКОС}^* = \text{const},$$

где  $T_{ГКОС}^*$  – полная температура газа перед турбиной компрессора определенная косвенным методом.

## Литература

1. *Вертолетные газотурбинные двигатели* / В.А. Григорьев [и др.]; под ред. В.А. Григорьева и Б.А. Пономарева. – М.: Машиностроение, 2007 – 491 с.
2. *Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей* / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1978. – Ч. 2. – 336 с.

Поступила в редакцию 28.05.2011

**Рецензенты:** канд. техн. наук Б.Ф. Федоренко, ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина; д-р техн. наук, проф. В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНО МОЖЛИВОЇ ВЕЛИЧИНИ ПОТУЖНОСТІ МАЛОРОЗМІРНИХ ТВАД З ВІЛЬНОЮ ТУРБІНОЮ В УМОВАХ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НАВКОЛИШНЬОГО ПОВІТРЯ

*О.В. Ведерников, Р.О. Шевченко, А.О. Штыков*

Розглянута можливість забезпечення максимальної величини потужності ТВаД в умовах високих температур навколишнього повітря за рахунок використання закону регулювання з непрямим визначенням (перерахуванням через заміряні параметри) повної температури газу перед турбіною компресора. Визначена доцільність та сфера застосування цього закону регулювання. Описана методика, що застосована для розрахунку параметрів непрямого визначення повної температури газу перед турбіною компресора через заміряні параметри для одного з ТВаД, що розробляються на ВАТ «Мотор Січ».

**Ключові слова:** турбовальний двигун, висока температура навколишнього повітря, потужність, температура газу, закон регулювання, непряме визначення.

## THE MAINTENANCE OF THE HIGHEST POSSIBLE POWER VALUES FOR LOW-SIZED TURBOSHAFT AIRCRAFT ENGINE WITH THE FREE TURBINE IN CONDITIONS OF WARM AMBIENT AIR TEMPERATURES

*O.V. Vedernikov, R.A. Shevchenko, A.A. Shtikov*

The possibility of maintenance the maximum power values for turboshaft aircraft engine in the conditions of warm temperatures of ambient air by use of the law of control with indirect determination (recalculation through measured parameters) of the total gas temperature upstream the compressor turbine is considered. The appropriateness and application range of the given control law are defined. The design procedure used in practice for indirect determination parameters of the total gas temperature upstream the compressor turbine by measured parameters for one of turboshaft aircraft engines, which are developed by JSC "Motor Sich", is described.

**Key words:** turboshaft engine, warm temperature of ambient air, power, gas temperature, law of control, indirect determination.

**Ведерников Олег Владимирович** – инженер-конструктор ОПРГДРиИП УГК ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: revers.ugk@motorsich.com.

**Шевченко Роман Александрович** – начальник группы ГДРиММ ОПРГДРиИП УГК ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: revers.ugk@motorsich.com.

**Штыков Андрей Александрович** – начальник ОПРГДРиИП УГК ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: revers.ugk@motorsich.com.